



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사 학위논문

수중 LED 통신 시스템 연구

Study on Underwater Optical Wireless Communication
Systems

지도교수 최 형 식

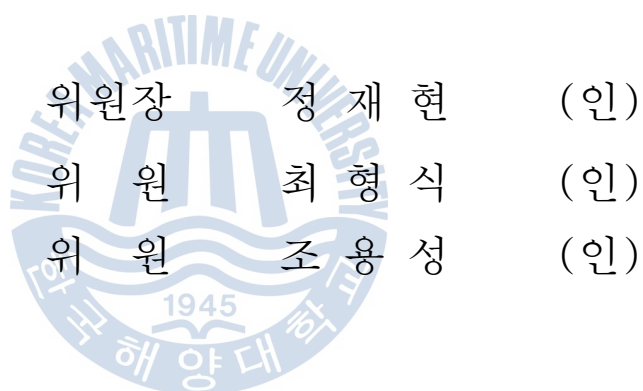
2015년 2월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

손 현 중

본 논문을 순현중의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2015년 10월 28일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iv
Abstract	vi
 1. 서 론	
1.1 연구배경	1
1.2 수중 LED 통신 시스템의 국내외 연구동향	1
1.3 연구 목적	4
 2. 수중광학 이론	
2.1 전자기 파장에 따른 광 감쇠율	5
2.2 해수의 광학적 특성	7
2.3 수중 LED 통신 성능 이론	9
 3. LED 송신기 설계 및 제작	
3.1 수중통신용 LED 선정	14
3.2 LED 방열	16

3.3 콜리메이트 렌즈 설계	18
3.4 액추에이터를 이용한 LED 광 확산 제어기 설계	22
3.5 LED 송신기 방수 하우징 외압 해석	29
3.6 LED 송신기 제작	34
 4. 광 수신기 설계 및 제작	
4.1 광 검출센서의 선정	36
4.2 집광렌즈 설계	44
4.3 트랜스임피던스 증폭기 설계	44
4.4 신호처리기 설계	46
 5. 수중 LED통신 성능시험 및 결과	
5.1 LED 송신기의 광 확산 제어기 성능시험	48
5.2 수중통신 성능평가 프로그램 제작	51
5.3 PIN 광수신기의 담수 수중통신 성능시험	52
5.4 PIN 광수신기의 해수 수중통신 성능시험	53
5.5 PIN광수신기, APD광수신기의 탁도에 따른 수중통신 성능시험 ..	57
5.6 수중 LED통신을 이용한 수중동영상 통신 실험	60
 6. 결론	
6.1 결론	66
 참고문헌	68

List of Tables

Table 1 Absorption and scattering coefficient of 514 nm wavelength	11
Table 2 Specification of LED collimate lens	19
Table 3 LED-lens ray tracking parameter	24
Table 4 Material property	30
Table 5 Buckling pressure	33
Table 6 Characteristics of a PIN photodiode material	38
Table 7 Characteristics of a APD material	40
Table 8 Performance results of the PIN receiver in freshwater	52
Table 9 Undersea communication test place	53
Table 10 Performance results of the PIN receiver in seawater	55



List of Figures

Fig. 1 Underwater LED communication system developed at MIT	2
Fig. 2 Underwater LED Comm technology for undersea survey	3
Fig. 3 Underwater LED Comm technology for seafloor node	3
Fig. 4 Un-tethered ROV using underwater LED comm system	4
Fig. 5 Light absorption in water data 1	6
Fig. 6 Light absorption in water data 2	6
Fig. 7 Drawing for LED	14
Fig. 8 Typical Color Spectrum	15
Fig. 9 Typical Spatial Radiation	15
Fig. 10 Typical Flux vs Junction Temperature	16
Fig. 11 Waterblock for LED heatsink	17
Fig. 12 Waterblock for LED heatsink	17
Fig. 13 Principle of collimating the LED light	18
Fig. 14 Drawing of LED collimate lens	19
Fig. 15 LED light collimate efficiency calculation idea	20
Fig. 16 LED light ray collimate efficiency	21
Fig. 17 Basic ray-tracking process	24
Fig. 18 LED-lens Distance : 50mm	25
Fig. 19 LED-lens Distance : 25mm	25
Fig. 20 LED-lens Distance : 0mm	26
Fig. 21 Design of LED transmitter cylinder	27
Fig. 22 Liner actuator input PWM format	28
Fig. 23 Liner actuator controller system	28

Fig. 24 Simple design of LED housing	29
Fig. 25 Distribution of stress	31
Fig. 26 Distribution of deformation	31
Fig. 27 Buckling mode shape	32
Fig. 28 Actual photo of the inside parts of the LED lamp	34
Fig. 29 Actual photo of the LED lamp cylinder	34
Fig. 30 Actual photo of the LED lamp cylinder	35
Fig. 31 Actual photo of the LED lamp cylinder	35
Fig. 32 Structure of CDS cell	36
Fig. 33 Structure of phototransistor	37
Fig. 34 Structure of photodiode	38
Fig. 35 Structure of APD	39
Fig. 36 Principle of APD	40
Fig. 37 Structure of the PMT	41
Fig. 38 Specifications of the PIN photodiode	42
Fig. 39 Characteristics of each wavelength of sensitivity PIN PD	42
Fig. 40 Specifications of the APD	43
Fig. 41 Characteristics of each wavelength of light sensitivity APD ...	46
Fig. 42 Application of the noise filter	46
Fig. 43 Application of the Instrument AMP	46
Fig. 44 Signal processing of the signal	47
Fig. 45 Stabilized signalt	47
Fig. 46 50 mm focus of lens	48
Fig. 47 25 mm focus of lens	48
Fig. 48 0 mm focus of lens	49
Fig. 49 position control of LED lamp for long focusing (50mm)	49

Fig. 50 position control of LED lamp for midium focusing (30mm)	49
Fig. 51 position control of LED lamp for short focusing (15mm)	50
Fig. 52 Test System Block Diagram	51
Fig. 53 Error Check Program UI	51
Fig. 54 Picture of underwater communication test	52
Fig. 55 Undersea communication test place	53
Fig. 56 PIN receiver performance testing methods in undersea	54
Fig. 57 Picture of PIN receiver performance testing in undersea	54
Fig. 58 Output signal in undersea	55
Fig. 59 Picture of water tank	57
Fig. 60 LED communication test in water tank	58
Fig. 61 LED communication test process flowchart	59
Fig. 62 LED communication test result	59
Fig. 63 The concept of underwater video communication system	60
Fig. 64 Picture of LED Transmitter	61
Fig. 65 Picture of LED Transmitter user monitor box	62
Fig. 66 Picture of LED Transponder	62
Fig. 67 Underwater video camera module	63
Fig. 68 Camera operation program UI	63
Fig. 69 Picture of testing in water tank	64
Fig. 70 Received underwater video pictures	65

Study on Underwater Optical Wireless Communication Systems

Son, Hyun Joong

Department of Mechanical Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

In underwater environment, a sonar is mostly used as a communication tool. However, its speed is not fast enough to transfer large data such as image. To speed up the data transfer speed, the LED light is used as a communication tool in this paper.

The overall structure of the system is introduced including the control system of the LED lamp, light transmission and receiver system. Finally, experiments were performed on the developed underwater communication system in sea water and fresh water and results are described.

KEY WORDS: Underwater LED communication, Underwater Optic wireless communication

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

해양탐사, 해양보존, 심해저 자원개발, 심해용 무인잠수정 운용에 있어서 수중 통신은 매우 중요한 수단이며[1], 수중 또는 해저에서 탐사 및 작업을 위한 수중로봇에는 많은 양의 데이터 처리를 위한 고속 통신이 요구되고 있다. 수중 음향과 통신은 수중에서 신호감쇠가 작고 열적 안정성이 우수하여 가장 광범위하게 사용되고 있다[2][3]. 그러나 천해에서는 온도 변화와 분포 영향, 수면에서 발생하는 잡음에 민감하며 음파의 반사와 굴절에 의한 다중경로 진행과의 간섭이 존재한다. 또한 수중에서의 음파속도는 전자기파에 비하여 매우 느리므로 통신속도가 수 kbps 이하로 제한된다. 이를 해결하기 위한 방안으로 고주파수 대역의 RF 수중 통신을 고려할 수 있지만 물의 매질 특성으로 고주파수에서 전도성을 보이기 때문에 감쇄가 심하여 통신을 위해 상당히 높은 안테나 출력이 요구되며 통신거리는 수 십 m 이하로 제한적이다[4][5]. 이러한 단점을 개선하고자 최근에 우즈홀 해양연구소, MIT 등에서 LED와 광 검출 소자로 구성된 수중 광무선 통신을 성공적으로 수행한 연구 결과들이 있으며[6][7][8], LED 및 레이저광을 활용한 수중통신 연구들이 늘고 있다. 이와 관련된 상세한 내용은 다음 “수중 LED통신 시스템의 국내외 연구동향”에 소개하였다.

1.2 수중 LED 통신 시스템의 국내외 연구동향

수중 LED통신 시스템의 국외 연구동향으로는 관련 연구를 활발히 진행하고 있는 MIT대학과 같이 협력하여 연구하는 우즈홀 해양연구소가 있

다. 유럽 일부에서도 연구하고 있으나 정확한 자료는 많지 않다. 특히, 군사적으로 응용이 가능한 분야여서 연구결과를 발표하지 않는 경향이 있다. 구체적인 내용은 다음과 같다.

1.2.1 매사추세츠 공과대학(MIT)

2010년 미국 MIT에서는 수중로봇을 제어하기 위한 광무선 수중 모뎀을 개발하고 있음을 발표하였다[8]. 테더케이블 없이 수중환경 하에서도 수중로봇을 안정적으로 제어할 수 있는 광무선 네트워크를 개발하는 실험으로, 5W 청색 LED 6개와 APD를 사용하여 수중 1 m 깊이에서 1.2 Mbps 단방향 통신을 30 m 거리까지 성공적으로 수행하였다.



Fig. 1 Underwater LED communication system developed at MIT

1.2.2 우즈홀 해양연구소 (WHOI)

우즈홀 해양연구소에서는 6 개의 청색 LED와 광증배관 (photomultiplier tube: PMT)으로 구성된 수중 LED통신 시스템을 개발하였으며, 태평양 해저에서 5Mbps로 100미터 이상 통신이 가능한 수준에 도달해 있다[9]. 또한 개발한 수중 LED통신을 다방면에 걸쳐 적극적으로 활용하고 있으며 첫번째 사례로 AUV와 수중노드사이에 LED통신을 하여

실시간으로 해저지형 조사 및 AUV를 실시간으로 제어하고 있다는 점이다.[10]

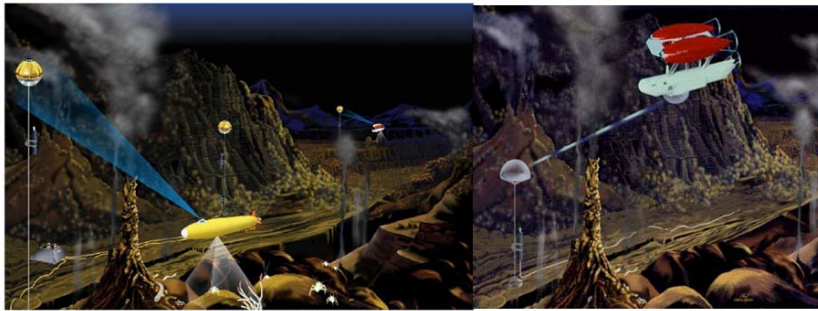


Fig. 2 The concept of underwater LED Communication technology for undersea survey

두 번째는 2012년 북태평양에 해저에 수중LED통신을 장착한 해저 관측노드를 설치하고 2013년에 해저 관측노드의 대용량 수집 데이터를 LED통신으로 회수에 성공함으로 해저 관측노드를 인양하는 비용과 시간을 절약한 사례가 있다[11].

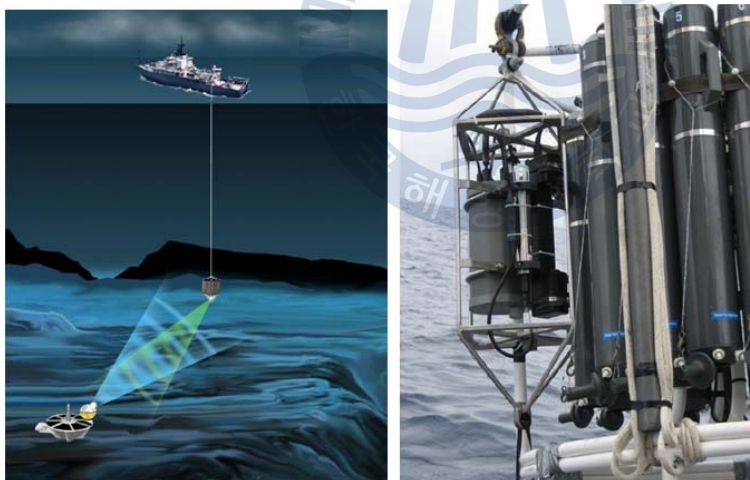


Fig. 3 Underwater LED Communication technology for seafloor node

communication

세번째는 수중LED통신을 이용해서 테더케이블이 없는 ROV 개발을 수행하고 있으며 이를 위해 LED통신으로 북태평양 해저에서 ROV의 화상 데이터 전송 등의 연구사례가 있다[12].

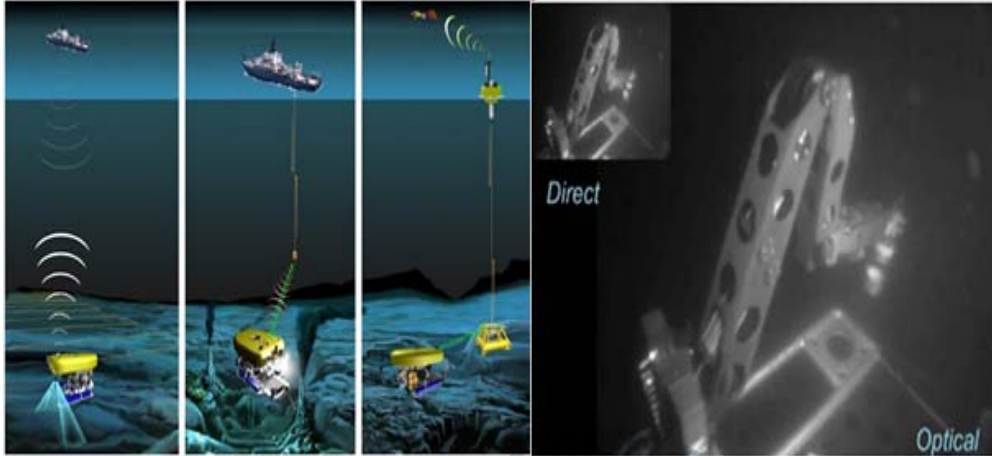


Fig. 4 Un-tethered ROV using underwater LED communication system

1.3 연구 목적

본 논문은 수중 고속통신을 실현하기 위한 수중 LED통신 시스템 연구에 관한 것으로, 수중에서 광 확산을 제어할 수 있는 LED 송신기 설계, PIN 포토다이오드 광수신기 설계, APD 광수신기 설계, 수중 동화상 데이터 전송 시스템 및 수중 양방향 LED 통신 시스템 설계를 수행하였으며 개발한 시스템을 담수와 해수 및 탁도조절 가능한 실험수조에서 통신성능 평가 시험과 수중에서 동화상 데이터 전송 실험을 수행하였다.

제 2 장 수중광학 이론

수중 LED 통신 시스템 설계에 앞서 수중환경에서 광이 진행하는데 어떤 물리적인 현상이 발생하는지 이해하기 위해 관련 내용을 조사하였으며, 크게 수중 광감쇠, 광산란, 수질에 따른 광학적 성질, 통신속도에 의한 광감쇠로 조사하였다.

2.1 전자기 파장에 따른 광 감쇠율

수중에서 청색광(약 400nm)은 전자기파 중에서 가장 물속을 잘 통과할 수 있는 주파수 대역이다. 해수는 전자기파를 깊이에 따라 지수함수적으로 감쇄시키지만 400~450nm의 파장 영역에서는 다른 파장영역에 비해 60dB~80dB정도 감쇄가 적은 성질이 있다. 따라서 충분한 세기의 광 에너지를 입사하면 아무리 깊은 수심일지라도 도달할 수 있다. Fig. 5, 6에서는 일반적으로 입사하는 태양광의 경우, 분리된 청색파장의 광은 수심 200m 이상 도달하는 특징이 있음을 알 수 있다.

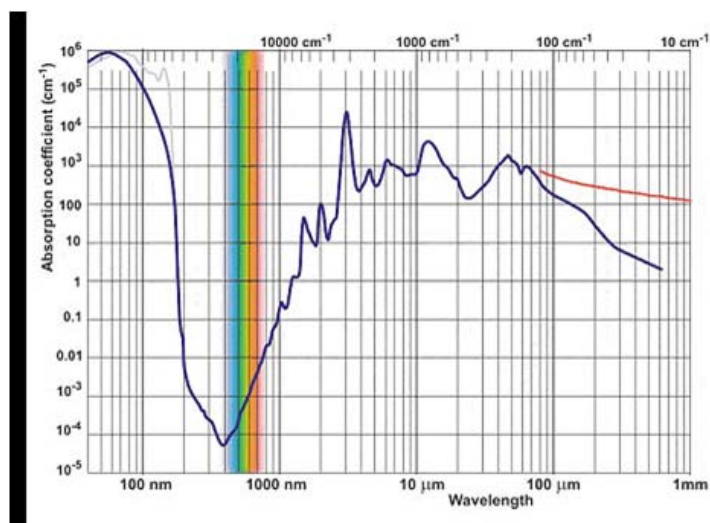


Fig. 5 Light absorption in water data 1

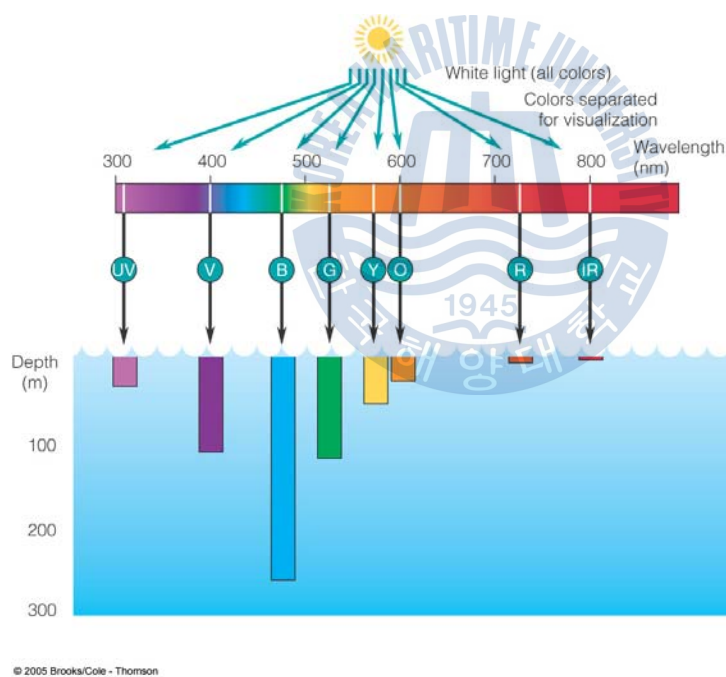


Fig. 6 Light absorption in water data 2

2.2 해수의 광학적 특성

해수를 전파하는 광파의 감쇄 정도는 일반적으로 다음과 같은 지수함수로 표시된다.

$$H(d) = H_0 \exp(-kd) \quad (1)$$

여기서

d : 광파의 전파거리(m)

k : 감쇄상수(m^{-1})

H₀ : 광파의 초기강도(W/cm^2)

이다. 콜리메이트된 LED광과 같은 광파의 경우 이 감쇄는 해수 자체 보다는 해수에 포함된 여러가지 불순물 입자 및 용해물질에 의한 흡수 및 산란에 의해 일어난다. 해수에는 플랑크톤, 유기 및 무기물질 그리고 용해된 유기물질 등이 다량 포함되어 있다. 이들 각각의 구성요소들은 독자적으로 독특한 특성이 있으며 이 때문에 불순물 입자의 구성비율이 다른 원양, 근해, 천해 사이에서도 광학적 특성이 다르다.

2.2.1. 해수의 광흡수 특성

순수한 해수에서 청색파장 영역의 흡수계수는 $0.015m^{-1}$ 정도로 알려져 있으며 전자기파 중에서 가장 적은 흡수율을 가지고 있다. 식(1)에 의하면 직진하는 광이 1m 전파하는데 1.49%의 감쇄를 일으킨다. 반면 흡수계수가 $k=0.14m^{-1}$ 정도로 알려진 근자외선(300nm) 파장 영역에서의 흡수는 급격히 증가하고 더욱이 200nm 파장에서의 흡수계수는 $3.1m^{-1}$ 정도로 직진광이 1m를 전파하는데 95%의 에너지를 잃게 된다. 또한 녹색 및 적색파장영역의 흡수계수는 $0.65m^{-1}$ 정도로 흡수율이 매우 크다.

플랑크톤에 의한 광흡수는 엽록소 때문에 일어나는데 대표적인 플랑크톤의 농도는 깨끗한 해수에서는 $0.01\text{mg}/\text{m}^2$, 대양의 해수에서 $0.1\sim 1\text{mg}/\text{m}^2$, 연안에서 $0\sim 10\text{mg}/\text{m}^2$ 정도로 알려져 있다. 플랑크톤에 의한 광흡수는 청색 및 적색파장에서는 크나 녹색파장에서는 상대적으로 적은 특성이 있다. 따라서 생물학적으로 생산활동이 활발하여 높은 플랑크톤 농도를 갖고 있는 연안에서는 청색영역 및 적색영역에서는 플랑크톤에 의한 흡수율이 높게 일어나나, 녹색영역에서는 상대적으로 적은 흡수가 일어난다.

2.2.2. 해수의 광산란 특성

해수의 광산란 특성은 일반적으로 체적산란함수($\beta(\psi, \lambda)$, 단위: $\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$)에 의해 나타낸다. 여기서 ψ 는 산란각을 나타내며 $0^\circ < \psi < 180^\circ$ 의 값을 갖는다. 해수에 대한 체적산란함수는 다음과 같이 광파의 빔 산란계수 $b(\lambda)$ 와 위상함수 $p(\psi)$ 로 분리하여 표시한다.

$$\beta(\psi, \lambda) = b(\lambda)p(\psi) \quad (2)$$

여기서 $b(\lambda)$ 는 m^{-1} 의 단위를 가지며 전체산란강도를 나타내고 $p(\psi)$ 는 sr^{-1} 의 단위를 가지며 광파가 입사된 방향으로 산란되는 확률을 나타낸다. 물분자나 용해된 입자는 가시광선의 파장에 비해 훨씬 작기 때문에 순수한 해수에 의한 산란은 그 구성분자의 열적요동에 의해 일어나며 Rayleigh 위상함수

$$p(\psi) = 0.062(1 + 0.835 \cos 2(\psi)) \quad (3)$$

에 의해 표시된다. 순수한 해수의 산란계수는 $b(\lambda)$ 로 광파의 파장에 의

존한다. 보통 해수에는 여러가지 부유입자들이 섞여있으며 대부분의 입자들은 가시광선의 파장에 비해 훨씬 커서 이들에 의한 산란은 **fraunhofer** 회절에 의해 좌우된다. 회절에 의한 산란은 극히 작은 산란각을 가지며 입자의 구성성분에 영향을 받지 않는다. 또한 크기가 일정하지 않고 입자의 운동방향을 갖기 때문에 동일한 입자들만으로 구성된 순수한 해수에서 나타나는 산란과 특성이 틀리다. 이러한 특성으로 해서 위상함수는 광파의 진행방향으로 그 최대치를 갖게되고 입사광의 파장과 입자의 농도 및 크기에 의존하지 않게 된다. 따라서 총산란계수는 깨끗한 물로부터 혼탁한 물로 갈수록 증가한다. 일반적으로 모든 산란의 절반정도는 입사각의 근처에서 일어나기 때문에 산란계수는 전방산란에 의해 거의 결정된다. 따라서 해수에 의한 산란은 후방산란에 대해 대단히 중요한 역할을 하며 깨끗한 물에서는 청색파장에서 후방산란이 일어날 확률이 크다.

2.3 수중 LED 통신 성능 이론

2.3.1. 수중 LED 통신에서 통신거리에 따른 광 감쇠 관련 이론

수중 LED 통신을 위해 LED 송신기와 광 수신기의 거리가 d 로 만큼 떨어져 있을 때, LED 송신 광의 파장에 대한 수중 광 감쇠 및 다른 요소의 노이즈를 백색 가우시안 노이즈 (AWGN, Additive White Gaussian Noise)로 고려할 수 있다. LED 송신기에서 특정한 파장으로 방출하는 광의 세기를 $I(\lambda)$ 라고 하고, 이 광이 수중에서 d 만큼의 거리를 진행했을 때 감쇠된 광의 세기 $dI(\lambda)$ 를 Beer의 법칙을 이용하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$dI(\lambda) = -c(\lambda)I(\lambda)dz \quad (4)$$

여기서 양변을 통신거리 d 에 대하여 적분하면 목표지점에 도달하는 광의 세기를 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-c(\lambda)d} \quad (5)$$

여기서

d : 통신 거리

$I(\lambda)$: 광 수신부에 도달한 광의 세기

$I_0(\lambda)$: LED 송신기의 초기 광의 세기

$c(\lambda)$: 물의 흡수계수와 산란계수의 합으로 얻는 감쇠계수

이다. 514nm 파장을 기준으로 다양한 수중환경에 대하여 알려진 흡수계수와 산란계수를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Absorption and scattering coefficient of various types of water at 514 nm wavelength

수질	흡수계수(m^{-1})	산란계수(m^{-1})
순수한 해수	0.0405	0.0025
대양	0.114	0.037
연안	0.179	0.219
항만	0.266	1.824

따라서 해수의 탁도가 높아질수록 흡수에 의한 광감쇠 보다 산란에 의한 광감쇠가 크게 발생한다는 사실을 확인할 수 있다.

LED 통신에서 광 수신부에 검출되는 광의 세기는 통신거리의 제공에 반비례하며 광 수신부 센서의 이득에 반비례 한다고 한다. 이것을 해수 광 감쇠 계수가 포함된 식(4)을 이용하여 정리하면 수중에서 광 수신부에 검출되는 광의 세기 값을 나타낼 수 있다.[15],

$$P_r = P_o \frac{A_r}{4\pi d^2} e^{-c(\lambda)d} \quad (6)$$

여기서

P_o : LED 송신기의 출력 광 세기

A_r : 광 수신부의 광 수신 면적

d : LED 송신기와 광수신부 간의 직선거리

이다. 따라서 해수의 감쇠계수가 높을수록 수신되는 광의 세기는 지수 함수적으로 감소됨을 알 수 있다.

2.3.2. 수중 LED 통신에서 통신속도에 따른 광 감쇠 관련 이론

Shannon-Hartley 정리에 따르면 채널용량(C, 단위 bps) 은 식 (7)으로 정리된다.

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (7)$$

여기서

B : 대역폭(bandwith, 단위 hz)

S : 신호 전력

N : 잡음 전력

이다. 수중 LED 통신의 관점에서 이를 해석하면 광 수신부의 이득은 수신되는 광의 세기에 비례하며 수신 데이터 속도에 반비례하는 함수로 표현할 수 있다[17] 따라서 **S/R**은 식(8)로 다시 나타낼 수 있다.

$$S/R = \frac{nGP_r}{2Rhc/\lambda} \quad (8)$$

여기서

n : 양자효율

G : 수신부의 이득

R : 통신 속도

h : 플랑크 상수, $6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$

c : 광속

이다. 식 (8)로부터 계산된 **S/N** 값을 식(7)에 대입하여 정리한 식(9)을 이용하면 LED 송신기의 출력 광을 이용하여 **S/R**을 구할 수 있다.

$$S/R = \frac{n\lambda GP_0 A_r}{8\pi d^2 Rhc} e^{-c(\lambda)d} \quad (9)$$

따라서 깨끗한 해역에서는 이득이 높은 센서가 S/R 을 크게 향상시키므로 빠른 수중 LED 통신이 가능할 것으로 예측할 수 있지만, 탁도가 높은 해역이나 항만에서는 산란계수의 영향이 크게 작용하여 노이즈가 증가하기 때문에 통신속도가 크게 감소할 것으로 예측할 수 있다.



제 3 장 LED 송신기 설계 및 제작

LED 송신기는 수중에서 무선송신 데이터를 입력받아 LED 광 신호로 전환하여 출력하는 장치로 크게 LED, 콜리메이트 렌즈, 방열장치, 광 확산 제어기로 구성하여 설계하였다.

3.1 수중통신용 LED 선정

수중에서 청색광은 전자기파 중에서 가장 물속을 잘 통과할 수 있는 주파수 대역임을 앞서 설명하였다. 따라서 용적이 제한된 수중로봇에 장착할 수 있도록 가능한 소형이어야 하고, 수중에서 광을 멀리 전달할 수 있도록 가능한 높은 출력의 LED를 선정하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 최대 80W 출력이며 CCT가 5600K으로 청색파장 성분이 가장 많이 분포해 있는 (Fig. 8) 백색 LED를 사용하였다.

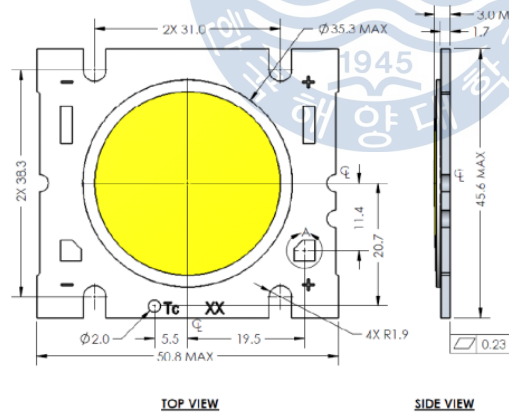


Fig. 7 Drawing for LED

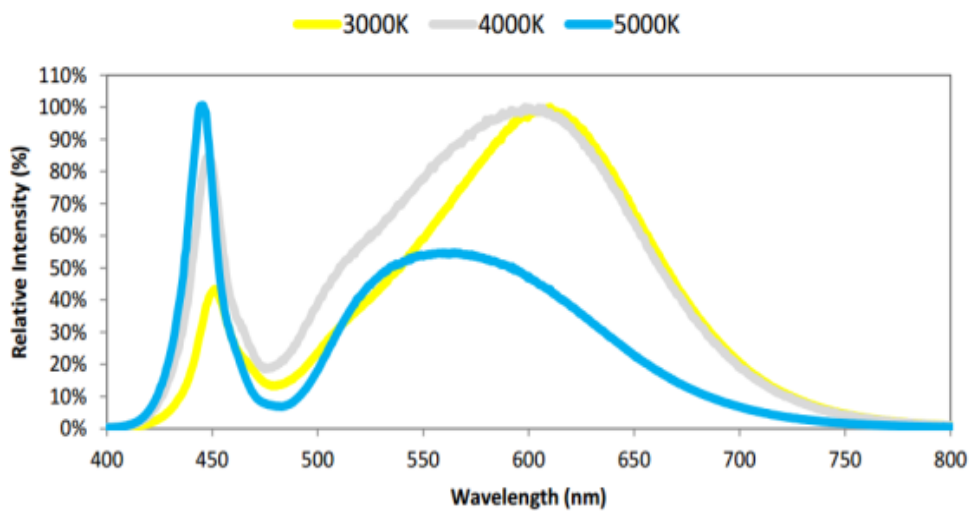


Fig. 8 Typical Color Spectrum

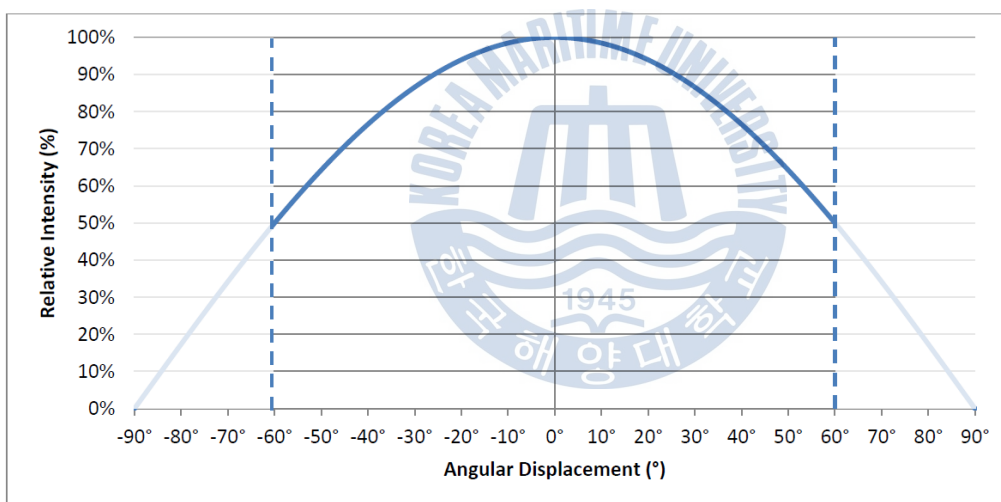


Fig. 9 Typical Spatial Radiation

3.2 LED 방열

LED는 온도가 상승할수록 **Luminous Flux** 가 감소하는 경향을 보인다 (Fig 10) 따라서 LED 수명보존 뿐 아니라 수중통신 성능유지를 위해서도 LED 기판을 균일한 온도로 유지하는 방열대책이 매우 중요하다. 본 논문에서는 컴퓨터 CPU 수냉시스템에 사용되는 워터블럭을 LED기판 뒷면에 부착하여 고정하였고 실린더 끝단까지 냉각수 순환 호스라인을 설치하였다. 그리고 임펠러 순환펌프로 냉각수를 실린더 외부에서 공급하여 냉각수를 강제순환하는 방법을 사용하였다.

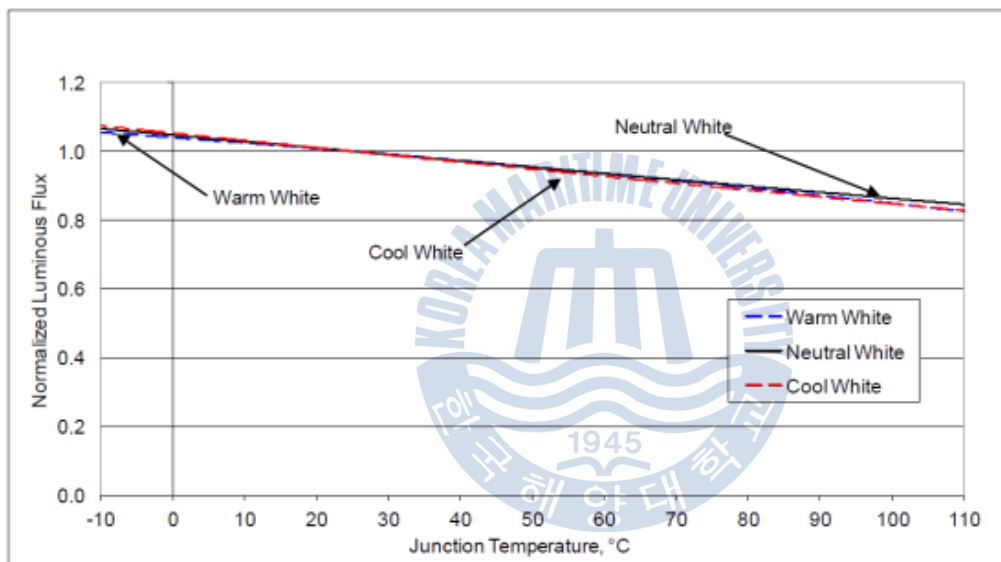


Fig. 10 Typical Flux vs Junction Temperature



Fig. 11 Waterblock for LED heatsink



Fig. 12 Waterblock for LED heatsink

3.3 콜리메이트 렌즈 설계

본 논문에서 사용한 LED 제품은 60도 정도의 넓은 각도로 방사함을 Fig 9 에서 알 수 있다. 방사각이 넓다는 것은 지향성이 낮다는 것으로 LED통신이 가능한 범위가 넓다는 이점이 있다. 하지만 수중에서는 해수 자체의 광흡수 특성과 해수에 포함된 여러가지 불순물 입자 및 용해물질에 의한 흡수 및 산란 등으로 공기 중에서보다 광감쇠가 크게 일어나기 때문에 광을 멀리 전송하기 위해서는 LED의 광을 최대한 콜리메이트 하여 지향성이 있도록 하는 것이 바람직하다. LED광을 콜리메이트 하는데 일반적으로 볼록렌즈 및 프레넬 렌즈(fresnel lens)를 사용하며 그 원리를 Fig 14 에 나타내었다. 또한 본 논문에서 사용한 LED 콜리메이트 렌즈의 외형치수와 사양을 Fig 13과 Fig 14 에 나타내었다.

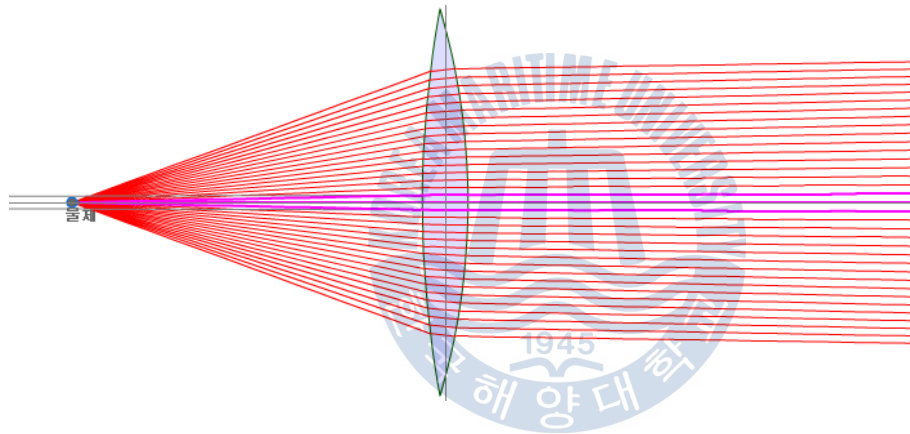


Fig. 13 Principle of collimating the LED light

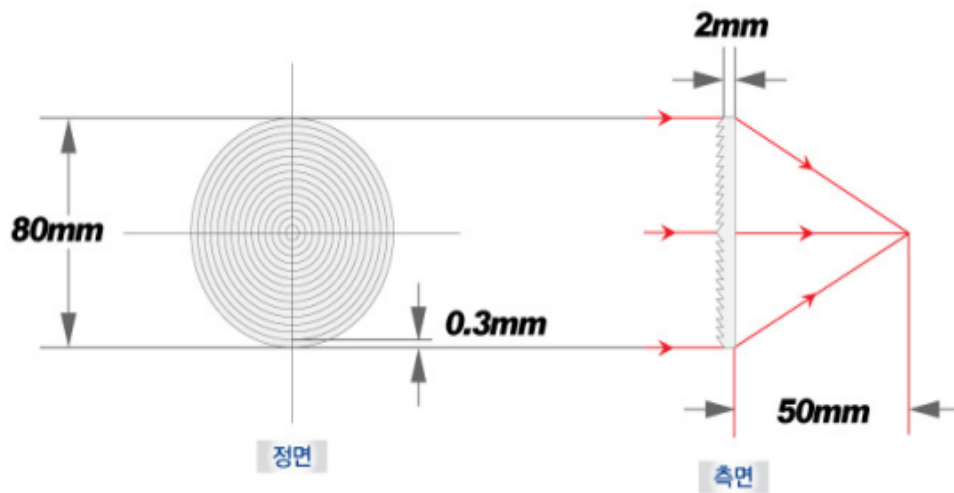


Fig. 14 Drawing of LED collimate lens

지름	80mm
초점거리	50mm
홀간격	0.3mm
두께	2mm
재질	PMMA

Table 2 Specification of LED collimate lens

콜리메이트 렌즈를 사용하는 광원의 경우 일반적으로 렌즈의 크기가 커질수록 콜리메이트되는 광량이 많아지므로 콜리메이트 효율이 증가한다. 이것을 정량화 하기 위해 LED광원의 0~180도 전방향으로 출력되는 광의

면적에 대한 렌즈를 거쳐서 출력되는 광의 면적 비율을 구하는 방법으로 LED 광의 콜리메이트 효율을 계산하는 식을 제안하고 이를 이용하여 렌즈의 지름에 따른 LED 송신기의 콜리메이트 효율을 계산하였다.

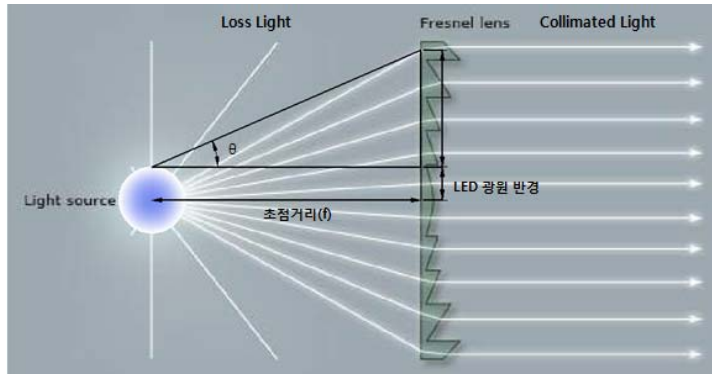


Fig. 15 LED light collimate efficiency calculation idea

먼저 본 논문에서 사용한 LED 칩의 Typical Spatial Radiation Pattern 그래프(Fig. 9) 는 다음 적분식(10) 으로 근사화 할 수 있다.

$$S = \int_0^{\theta} 100 \cos\left(\frac{\pi}{180}x\right) dx \quad (10)$$

반경이 LR인 LED광원과 반경이 CR인 콜리메이트 렌즈가 서로 초점거리 f 만큼 떨어져 있을 때, 콜리메이트 되는 LED의 최대 방사각 CØ은 다음 식(11) 을 통해 얻을 수 있고, 구해진 Ø을 식(1) 에 대입하여 풀면 콜리메이트 되는 광의 반면적을 구할 수 있다.

$$\theta^{\circ} = \text{Atan}\left(\frac{CR - LR}{f}\right) \quad (11)$$

따라서 LED칩의 0~180도 전체 출력 광의 반면적에 대한 콜리메이트 되는 광의 반면적에 대한 비율을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Efficiency(\%) = \frac{\int_0^{90} 100\cos(\frac{\pi}{180}x)dx}{\int_0^{\theta} 100\cos(\frac{\pi}{180}x)dx} \times 100 \quad (12)$$

위에서 제시한 식에 근거하여 LED 광원의 반경 15mm, 렌즈의 초점거리 50mm 으로 고정하되, 렌즈의 직경을 50mm에서 500mm까지 1씩 증분하여 계산한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 따라서, 80Ø 렌즈를 사용한 LED 경우는 LED의 총 광량 중 45%만이 렌즈를 거쳐 콜리메이트 되어 밖으로 방출되고 나머지 55%가 렌즈를 거치지 못하고 있음을 확인하였다. 만일 130Ø 의 렌즈를 사용한다면 80Ø 의 렌즈보다 30%의 광량을 더 많이 콜리메이트 할 수 있을 것으로 짐작할 수 있지만 그만큼 실린더의 크기는 증가할 것이다.

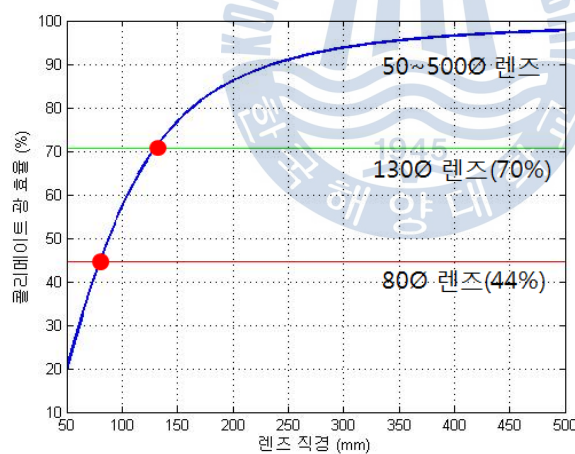


Fig. 16 LED light ray collimate efficiency

3.4 액추에이터를 이용한 LED광 확산 제어기 설계

광을 멀리 전송하기 위해서는 LED의 광을 렌즈로 콜리메이트 하는것이 먼거리 수중통신에 적합하지만, 수중 근거리 통신을 할 경우에는 LED 송신기의 광을 확산시킴으로 통신 가능한 범위를 넓히는 것이 안정적인 통신을 달성하는데 유리하다. 또한 LED 송신기를 수중 조명등으로 사용할 경우 수중에서 근거리 작업을 할 때는 확산되는 조명이 좋고 먼 거리의 물체를 인식하기 위해서는 확산이 적게 되는 것이 유리하다. 일반적인 수중 조명등은 근거리 확산용으로 제작되어 상기의 여러 가지 작업에 어려운 경우가 많았다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 렌즈와 LED 광원과의 거리를 변경하여 LED광의 확산을 제어하는 연구를 하였고 이를 이용하여 LED 송신기에서 방출되는 광의 확산을 제어할 수 있는 LED-렌즈 초점제어기 기구부와 제어기를 개발하였다. LED와 렌즈 간 거리에 따른 광의 진행 경로를 대략적으로 예측하기 위해 광선추적법을 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 직접 제작하여 수행하였다.

3.4.1 LED-렌즈 초점제어기 시뮬레이션

광선추적의 기본적인 원리는 다음의 스넬법칙을 이용한다. (식 13)

$$n_1 \sin \theta_o = n_2 \sin \theta_i \quad (13)$$

여기서 θ_o 는 광선의 입사각, θ_i 는 광선의 굴절각, n_1 은 광원이 발생한 곳의 굴절률, n_2 는 굴절이 발생한 다른 재질(렌즈)의 굴절률을 의미한다. 그

러나 실제로 반구형 렌즈의 광선추적을 하는 과정에서 광선의 방사각(a_o)과 광원(S)-렌즈면(V)거리(s_o), 렌즈의 반경(R) 정보만 주어지므로 스넬법칙 전개에 필요한 θ_o 를 구하기 위해서는 몇 가지 기하학적인 계산을 필요로 한다. 먼저 h 값은 식 (14) 과 같이 구하여진다.

$$h = ((S_o + R)\sin a_o) - ((S_o + R)\cos a_o)\sin a_o \quad (14)$$

Fig. 17 에서 선분 \overline{CA} 는 곡률반경과 동일하므로 다음 (식 15) 를 통하여 θ_o 값을 구할 수 있다.

$$\sin \theta_o = \sin a_o + \frac{h}{R} \quad (15)$$

구해진 θ_o 값과 재질에 따른 적절한 굴절률 값을 스넬법칙(식 15) 에 대입하여 얻어진 굴절각 만큼 빛의 진행 방향을 수정하는 원리로 이 과정을 모의실험상의 광선의 개수만큼 일정한 시간마다 반복하여 화면에 출력함으로써 전체적인 광선의 흐름을 예측할 수 있는 것이 본 모의실험 프로그램의 원리이다. Table 3의 조건으로 모의실험 프로그램을 수행한 결과 빛의 직진성과 확산성이 LED와 렌즈간 거리에 따라 크게 변화함을 보였다.(Fig 18, 19, 20)

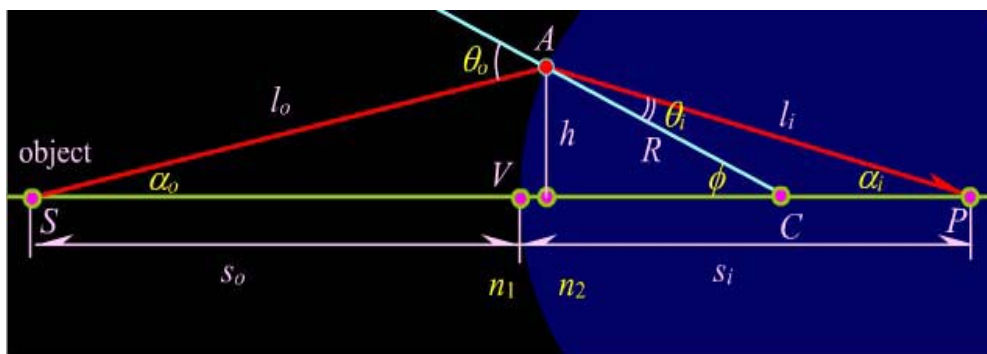


Fig. 17 Basic ray-tracking process

렌즈의 종류	구면
렌즈의 지름	80mm
렌즈의 초점거리	50mm
광선의 갯수	1000
실린더 내부(공기) 굴절률	1
렌즈(유리)의 굴절률	1.3
실린더 외부(해수) 굴절률	1.34

Table 3 LED-lens ray tracking parameter

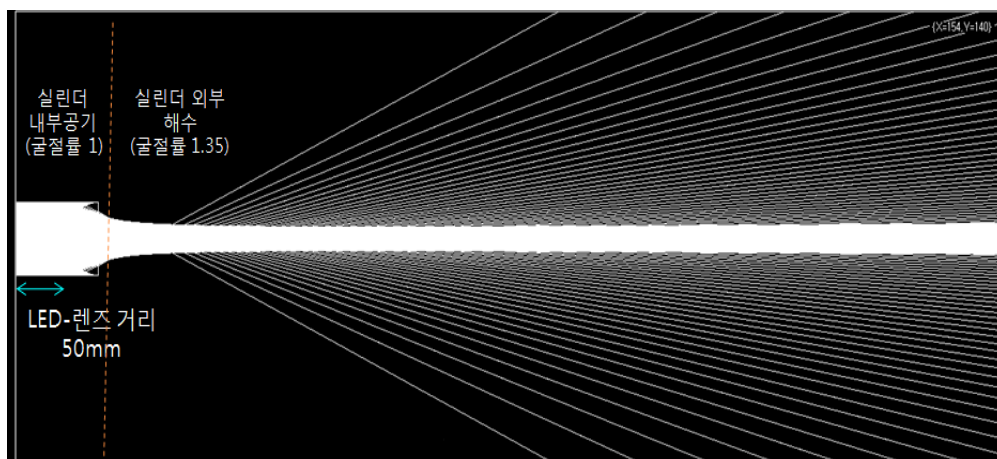


Fig. 18 LED-lens Distance : 50mm

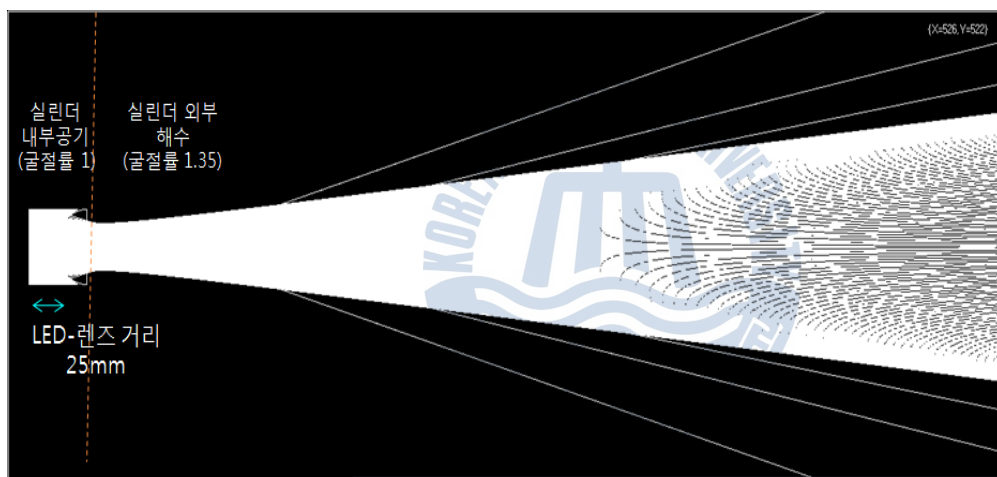


Fig. 19 LED-lens Distance : 25mm

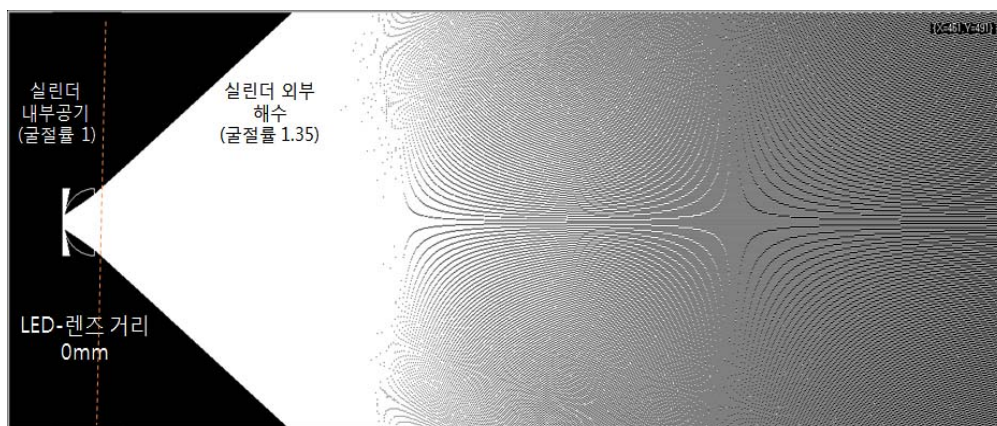


Fig. 20 LED-lens Distance : 0mm



3.4.2 LED-렌즈 초점제어기 설계

LED-렌즈 초점제어기의 기구부는 Fig. 21와 같이 제어기, 액추에이터, 워터재킷, 볼부쉬, LED 및 렌즈로 구성하였다. 소형 리니어 액추에이터를 이용해 LED를 렌즈 방향의 축으로 이송하는 구조로 설계하여 통신 상황에 따른 LED광의 방사 각을 제어할 수 있도록 구성하였다.

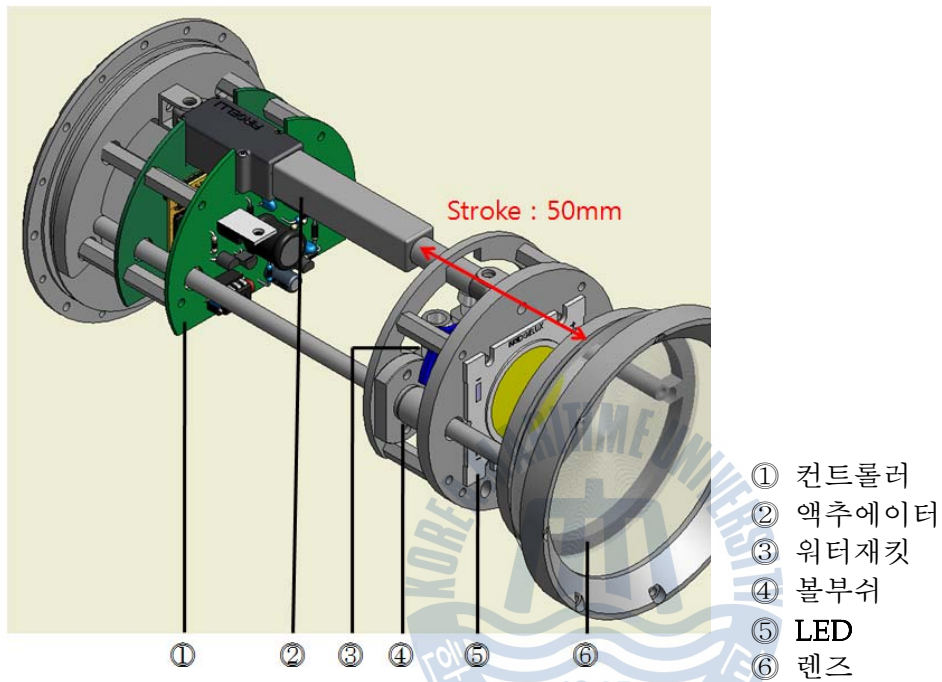


Fig. 21 Design of LED transmitter cylinder

3.4.3 액추에이터 제어기 설계

LED 광 확산 제어시스템에 사용된 리니어 액추에이터는 드라이버가 내장되어 있으며 제어입력으로는 특정 포맷의 PWM 신호를 사용한다 (Fig. 22).

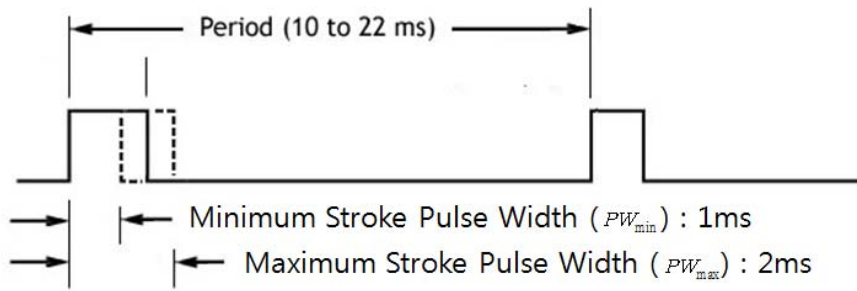


Fig. 22 Liner actuator input PWM format

여기서 액추에이터의 최대 스트로크를 st_{\max} 라고 정의하고 액추에이터 로드 끝단이 목표 위치값 x 에 위치하고자 할 때 입력 PWM 신호의 펄스 폭 C_{pw} 은 다음과 같이 구하여진다.

$$C_{pw} = pw_{\min} + \frac{pw_{\max} - pw_{\min}}{st_{\max}} \times X \quad (16)$$

상기의 입력신호에 따라 리니어 액추에이터에 부착된 LED등과 렌즈의 거리는 PID제어기를 적용하며 이의 블록선도는 Fig 23 와 같다.

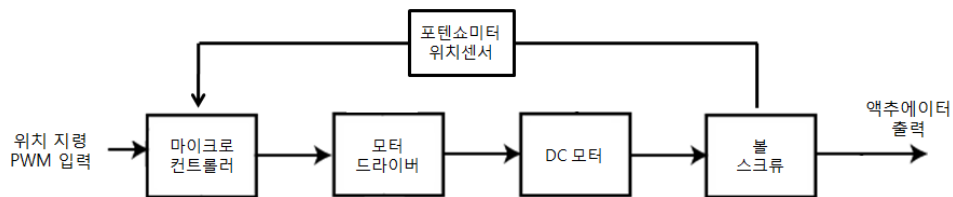


Fig. 23 Liner actuator controller system

3.5 LED 송신기 방수 하우징 외압 해석

수중 LED 하우징의 외압에 대한 최적설계를 위하여 유한요소해석방법 (Finite Element Method)을 이용하였다. 이를 위해 유한요소모델에서 수중 LED 하우징의 재질에 따른 특성을 고려하여 적용하였다. 수중 LED 하우징의 외부 형상을 간략화 하여 모델링하였다.

Fig 24 는 수중 LED 하우징의 간략화 모델이다. 하우징 직경은 100mm, 높이 222mm 하우징 두께 는 6mm, 하우징 뚜껑의 두께는 10mm 로 실제 제작품과 동일한 치수를 이용하여 모델링 하였다. 하우징의 재질은 Al6061 이고 물성치는 및 Element Type 는 Table 4 와 같고, 모델링 된 하우징의 하단을 고정 시키고 하우징 외부에 압력을 가하며 외압 해석을 실시한 결과 안전 외압 강도(Safety External Pressure)는 8 MPa 이 나왔다.

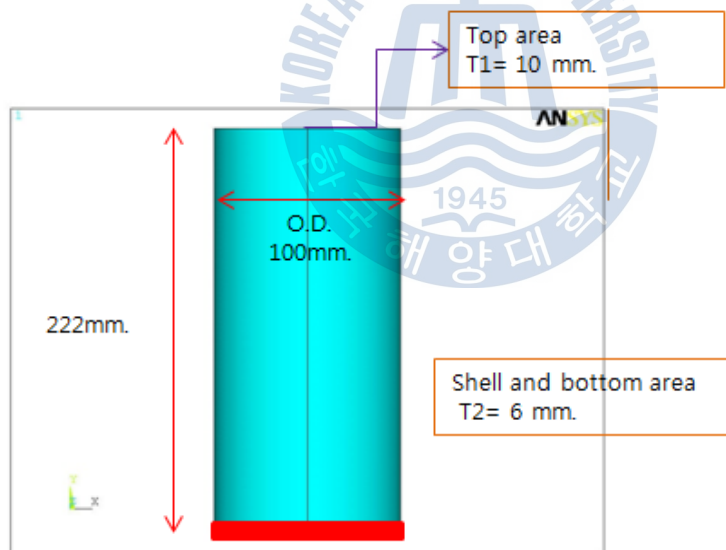


Fig. 24 Simple design of LED housing

Table 4 Material property

Modulus of Elasticity	Poisson's Ratio	Density (kg/m^3)	Allowable Stress (Sa)	Element Type	Safety External Pressure
69 GPa	0.33	2710	121 MPa	Shell 181 (4 node)	8 MPa

Fig 25 은 구해진 안전외압강도에서 응력해석을 실시한 결과 바탕으로 응력 해석을 실시한 결과 이다. 이때 최대 응력은 **181 MPa** 이며, Fig 25 은 안전외압강도에서의 변위 이고 최대 변위는 하우징 뚜껑부에서 **0.00265mm** 의 변위가 발생하였으며, 하우징 방수를 위한 **O-ring** 의 성능에 영향을 끼치지 않을 정도의 변위가 발생 하였다. 이때 Fig 26 의 최대 응력의 발생 부위가 실린더 위쪽의 모서리부 (Edge)에 발생하여 ASME에서 규정한 성능 평가 로 응력 평가를 하였다.

$$P_L + P_b < 1.5S_a \quad (17)$$

(P_L : Local Stress, P_b : Bending Stress, S_a : Allowable Stress)

$$181MPa(\text{해석에 의한 값}) < 121MPa \times 1.5$$

$181MPa < 181.5MPa$ 이므로 안전외압강도 **8 MPa**에서 허용 응력 내의 응력이 발생함을 검증 하였다.

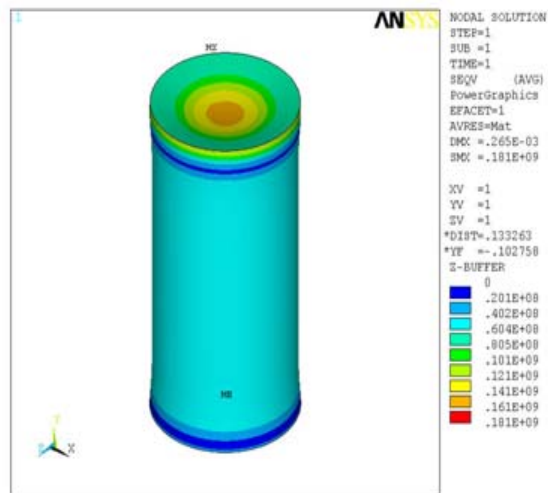


Fig. 25 Distribution of stress

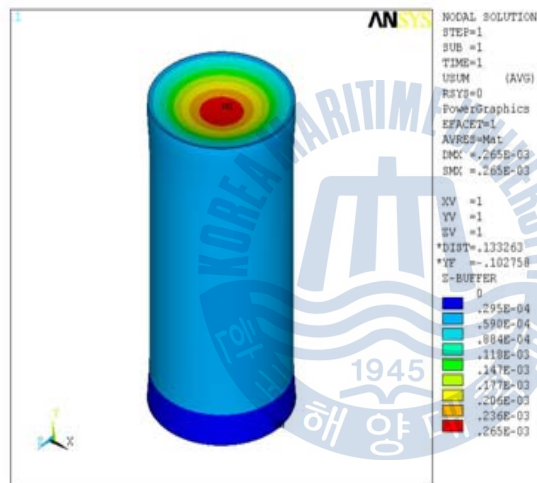


Fig. 26 Distribution of deformation

다음으로 일반적으로 수중에서 사용되는 압력용기의 해석 시에 압력 해석 이 외에 동반되는 좌굴 모드(Buckling Mode)해석을 수행하였다.

다음의 Fig 27 과 같이 4가지 좌굴 모드를 해석한 결과는 Table 5 와

같다.

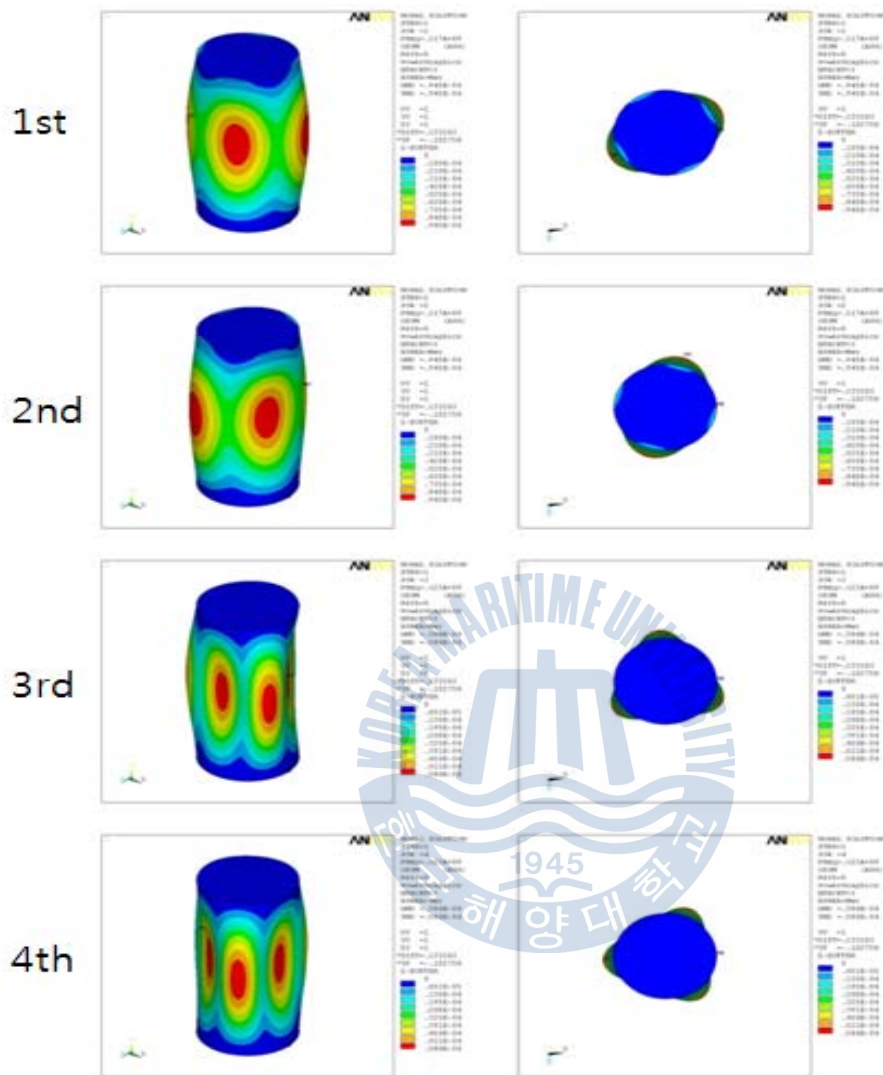


Fig. 27 Buckling mode shape

Mode Number	1st	2nd	3rd	4th
Buckling Pressure	116.97	116.97	123.01	123.01
	MPa	MPa	MPa	MPa

Table 5 Buckling pressure

따라서 안전 외압 강도(8 MPa)이 최소 좌굴 압력(116.97 MPa)보다 작으므로 방수 LED 하우징은 안전 외압 강도인 8MPa 의 환경에서 운용 가능 할 것 이라고 판단되어진다. 또한 8 MPa = 78.953861 기압 이므로 안전을 약 1.5배를 적용 하였을 때 500m 의 수심에서 개발된 수중 LED 하우징을 운용 할 수 있음을 시뮬레이션으로 확인 및 검증 하였다.



3.6 LED 송신기 제작

제작이 완료된 LED 송신기의 내외부 사진을 수록하였다.

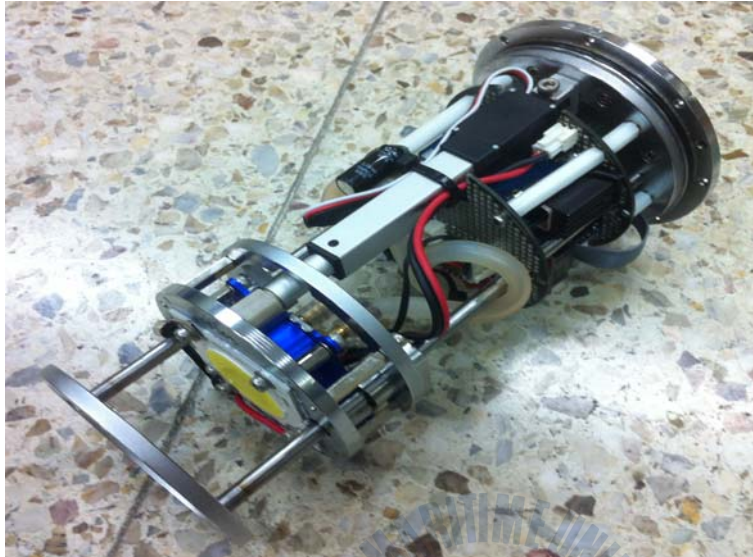


Fig. 28 Actual photo of the inside parts of the LED lamp



Fig. 29 Actual photo of the LED lamp cylinder



Fig. 30 Actual photo of the LED lamp cylinder



Fig. 31 Actual photo of the LED lamp cylinder

제 4 장 광 수신기 설계 및 제작

광 수신기는 수중에서 LED 송신기로부터 수신된 광 신호를 검출하고, 신호처리를 거쳐 디지털 통신신호로 변환하여 프로세서로 출력하는 장치로 크게 포토센서, 집광렌즈, 전단증폭기, 신호처리기로 구성하여 설계하였다.

4.1 광 검출센서의 선정

LED 수신기의 포토 센서를 선정하기에 앞서 광 검출 센서의 종류와 특성들을 조사하였다.

4.1.1 광도전셀(Photoconductive cell)

광도전 효과를 이용한 것으로 조사된 빛의 강약에 따라 저항값이 변화하는 성질이 있으므로 전극간에 전압을 인가하여 빛에 의한 저항 변화를 전류 변화로 바꾸어 외부 회로로 끌어내는 형식으로 사용한다. 565nm 부근의 파장에서 감도가 가장 좋으며 인간의 눈과 매우 유사한 특성을 나타낸다. 그러나 밝은 빛에 노출된 후 복원되기까지의 응답시간(response time)이 10~100[ms] 정도로 늦고 히스테리시스(hysteresis)가 큰 결점이 있다. 따라서 응답속도가 빨라야 하는 분야에 사용이 부적합하다. CdS셀의 구조는 Fig 32과 같다.

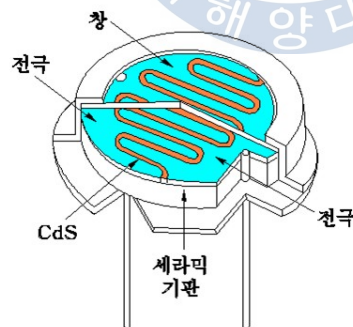


Fig. 32 Structure of CDS cell

4.1.2 포토트랜지스터 (Photo Transistor)

투명한 창(베이스)에 빛을 조사하면 빛 에너지에 의해 생긴 정공과 전자가 외부 회로로 나가게 되는데, 입사광에 의해 전자와 정공이 생기면 역전류가 증가하여 입사광에 대응하는 출력전류를 얻을 수 있다. 입사광의 세기대비 출력전류 응답의 직선성이 나쁘므로 조도 측정에는 사용되지 않으며 속도가 느리기 때문에 주로 광의 유무를 검출하는 스위치로써 사용되고 통신용으로는 사용되지 않는다.

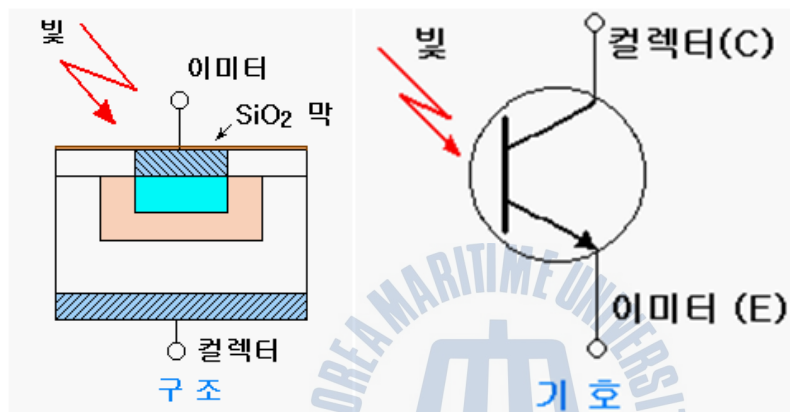


Fig. 33 Structure of phototransistor

4.1.3 PIN 포토다이오드 (PIN type photodiode)

PIN 포토다이오드는 p - n 접합 사이에 비저항이 큰 진성영역(intrinsic layer)을 형성하여 pin 구조로 한 것이다. 역방향 바이어스 전압을 인가하면, 인가전압의 대부분은 고저항의 i - 층에 걸리게 되어 i - 영역은 완전히 공핍층으로 된다. 이와 같은 상태에서 에너지 갭보다 더 큰 에너지를 갖는 빛이 입사되면, 얇은 p층을 통과한 후 그 대부분이 i - 층에서 흡수되어 전자 - 정공 쌍이 발생하고, 이 전자와 정공은 즉시 분리되어 내부 전

계에 의해서 전자는 n^+ 영역으로 정공은 p^+ 영역으로 이동하여 전류를 방출한다. **pin** 포토다이오드는 실질적인 공핍층의 두께가 증가하여 센서의 정전용량이 감소하므로 암전류(**dark current**)가 작으며 양자효율이 높고 고속의 응답특성이 있다. 또한 동작전압(역바이어스 전압)이 낮아 회로구성이 용이하고 가격이 저렴하다.

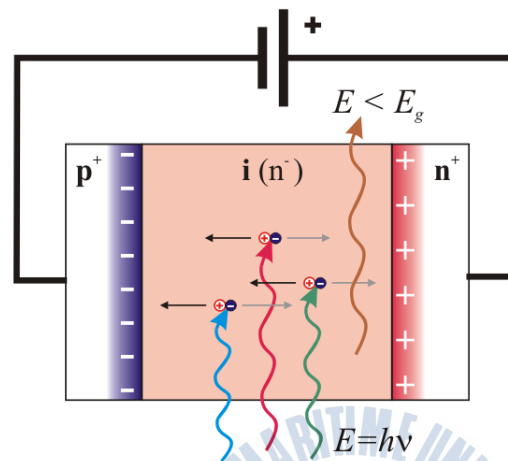


Fig. 34 Structure of photodiode

Table 6 Characteristics of a PIN photodiode material

재료	피크 파장	최대 양자효율	최대 응답도 (A/W)	바이어스 역전압 (V)
Si	800 ~ 900	약 0.8	0.5	5 ~ 100
Ge	500 ~ 1800	약 0.55	0.7	6 ~ 10
InGaAs	1300 ~ 1550	약 0.8	1.1	5 ~ 6

4.1.4 애벌런치 포토다이오드 (APD)

애벌런치 포토다이오드는 PN 접합에 100~200V 이상의 높은 역바이어스 전압을 가하여 공핍층 내에 고전기장을 형성하고 이것에 의해 광캐리어가 가속되어 물질 내의 원자에 충돌하고 새로운 전자-정공 쌍을 발생시킨다. 이러한 충돌이 반복되어 p층에서 전자와 정공의 수가 눈사태처럼 급격히 증배하는 애벌런치 현상을 효과적으로 이용한 것이다. 따라서 하나의 입사 광자에 대해 수십 수백개의 전자-정공 쌍을 생성하므로 광 감도(Sensitivity)가 좋은 내부 증폭형 광센서이다. 애벌런치 증가에 의해 높은 광전 변환 효율뿐 아니라 큰 광류를 얻을 수 있고, S/N 비를 향상시킬 수 있어 고속장거리 광 통신용으로 많이 사용되고 있다. 반면 높은 역바이어스 전압이 필요하므로 회로구성이 어렵고, 고가이다. 또한 온도변화에 민감하다.

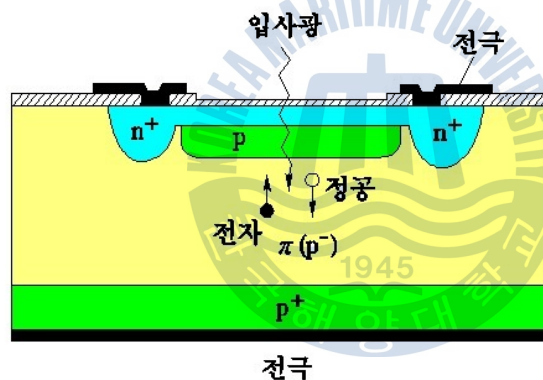


Fig. 35 Structure of APD

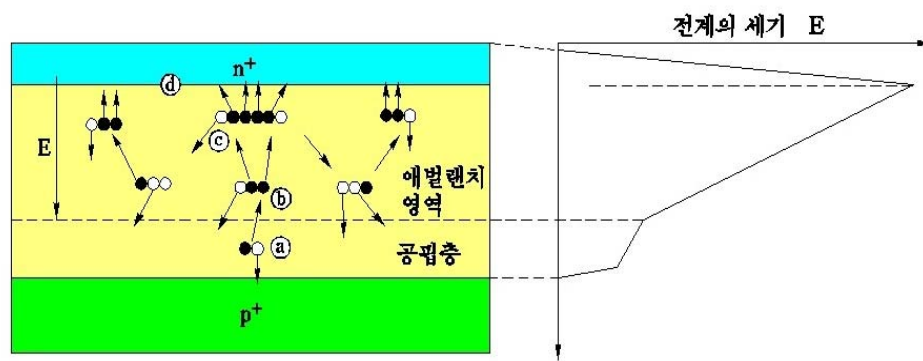


Fig. 36 Principle of APD

Table 7 Characteristics of a APD material

재료	파장 범위 (nm)	최대 응답도 (A/W)	이득	암전류 (nA)
Si	400 ~ 1100	40~130	10~100	1~10
GE	700 ~ 1700	4~14	10~20	1~10
InGaAS-InP	800 ~ 1700	0.7~0.9	< 1	0.1~10
InGaAs-InP	800 ~ 1750	7~18	10~20	10~100

4.1.5 광전 증배관 (PMT)

PMT 내부는 진공상태이며, 구조는 아래 Fig 37 와 같이 입사창, 광음극 (photocathode), 전자 증폭기(electron multiplier, dynode2) 가 밀봉된 유리 튜브 안에 위치하고 있다.

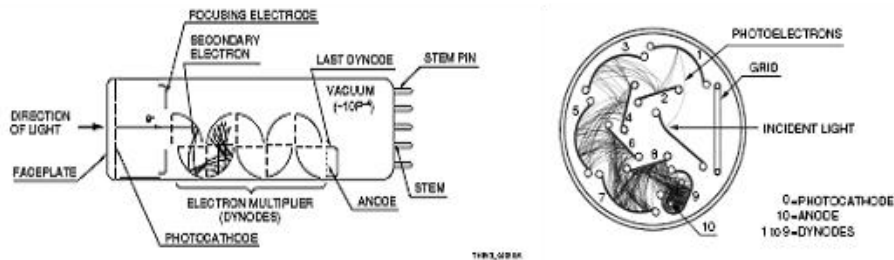


Fig. 37 Structure of the PMT(left) and Electron are amplified through the Dynode(right)

빛이 PMT 튜브로 입사되면 아래와 같은 순서로 검출 신호를 생성 시킨다

- (1) 입사창을 통해 빛이 입사된다.
- (2) 광음극에서 광전효과로 인해 여기된 광전자들이 진공계로 방출된다.
- (3) 여기된 전자들은 1차 전자 증폭기로 들어간다.
- (4) 1차 전자 증폭기에서는 더 많은 전자들을 생성한다.
- (5) 1차 전자 증폭기에서 증폭된 전자들은 2차, 3차 전자 증폭기를 통해 계속적으로 더 많은 전자들을 생성 시킨다.
- (6) 마지막으로 최종 전자 증폭기에서 나온 여기된 전자들은 양극 (Anode)에 도달하며 전기적신호를 생성한다.

PMT는 굉장히 약한 광신호를 우수한 S/N비로 검출할 수 있는 광센서이지만 1000V이상의 전압이 필요하고 매우 고가이다.

4.1.6 광 수신기의 포토센서 선정

본 논문의 광 수신부는 2가지의 포토센서를 선정하여 제작하였다. 첫 번째로 제작한 광 수신기는 근거리 수중 LED통신을 목적으로 하여 광전 변환 이득이 작지만 저렴하고 진단증폭기를 간편하게 구현할 수 있는 PIN 포토다이오드를 채택하고, 두 번째로 제작한 광 수신기는 광전변환 이득이 높고 수 Mhz의 고속통신이 가능한 APD를 채택하였다. 채택한 PIN 포토다이오드 및 APD의 사양을 나타내었다.

CHARACTERISTIC	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Short Circuit Current	H = 100 fc, 2850 K	1.0	1.3		mA
Dark Current	$V_R = 10V$		10	30	nA
Shunt Resistance	$V_R = 10\text{ mV}$	15	30		M Ω
Junction Capacitance	$V_R = 10\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$		300		pF
Spectral Application Range	Spot Scan	350		1100	nm
Responsivity	$\lambda = 450\text{ nm V}, V_R = 0\text{ V}$	0.15	0.17		A/W
Breakdown Voltage	$I = 10\text{ }\mu\text{A}$	30	50		V
Noise Equivalent Power	$V_R = 0V @ \lambda = \text{Peak}$		3×10^{-13}		W/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Response Time**	$R_L = 50\text{ }\Omega, V_R = 0\text{ V}$		190		nS
	$R_L = 50\text{ }\Omega, V_R = 10\text{ V}$		13		

Fig. 38 Specifications of the PIN photodiode

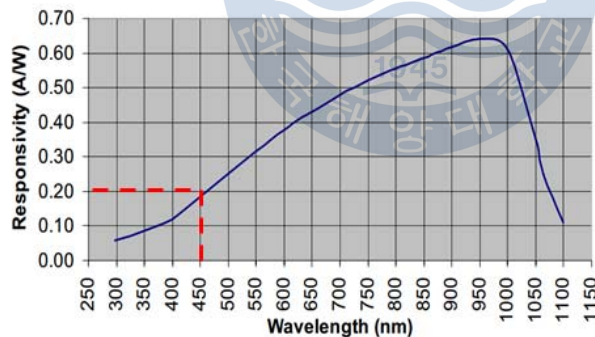


Fig. 39 Characteristics of each wavelength of light sensitivity PIN photodiode

APD Active Diameter (mm)	Continuous Incident Light Intensity APD gain =200 $\lambda=675\text{nm}$ (μW)	APD Gain @ 23°C $\lambda=675\text{nm}$	Ambient Operating Temp. (°C)	Storage Temp. (°C)	Supply Voltage (V)
3	0.6	350	0 to +40	-40 to +70	$\pm 13 \pm 6$

Fig. 40 Specifications of the APD

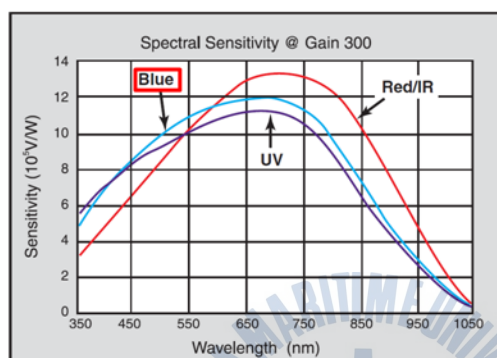


Fig. 41 Characteristics of each wavelength of light sensitivity APD

4.2 집광렌즈 설계

수중에서는 광 감쇠와 산란에 의해 최종적으로 수신기에 도달하는 광신호의 강도가 적기 때문에 외부로부터 입사하는 광을 포토센서로 집광함으로써 광 수신율을 향상시킬 수 있는 집광렌즈를 사용하였다. 집광렌즈를 사용함으로써 주변의 잡음광을 차단하는 효과가 있어 신호대 잡음비(S/N)를 향상시킬 수 있는 이점이 있다.

4.3 트랜스임피던스 증폭기 설계

트랜스임피던스 증폭기는 전류를 입력으로 받아 비례하는 전압을 출력으로 내보내는 증폭기이다. 따라서 광전변환 작용을 하는 포토다이오드의 전단 증폭기로 사용된다. 트랜스임피던스 증폭기 회로는 포토다이오드 및 트랜스임피던스 증폭기와 네거티브 피드백 저항으로 이루어져 있다. $-V_B$ 전압은 포토다이오드의 사양에 따라 결정한다. 대역폭과 입력저항이 무한대인 이상적인 증폭기를 가정하면, 전체 트랜스임피던스 증폭기의 입력저항, 트랜스임피던스 이득 및 대역폭은 다음과 같이 결정된다.

$$Z_{IN}(0) = \frac{R_F}{1+A} \quad (18)$$

$$Z_T(0) = \frac{V_o}{i_{IN}} = R_F \quad (19)$$

$$f_{-3dB} = \frac{1+A}{2\pi R_F(C_{pd} + C_D)} \quad (20)$$

여기서

A : 개루프 전압이득

Rf : 네거티브 피드백 저항값

C_{pd} : 포토다이오드의 캐패시턴스

I_{IN} : 포토다이오드 출력전류

이다. 위 식과 같이, 피드백 저항 R_f 는 입력저항을 낮춤으로써 대역폭 결정이 포토다이오드의 캐패시턴스에 덜 민감하도록 하며, 또한 입력단의 바이어스전압을 결정하는 역할을 한다. 트랜스임피던스 이득은 R_f 로 결정되기 때문에, R_f 의 값을 키우게 되면 트랜스임피던스 이득은 커지나, 입력 저항이 커지게 되고 따라서 대역폭이 감소하게 된다. 또한, 대역폭은 입력단의 기생 캐패시턴스 성분에 의해서도 결정되어지기 때문에 대역폭을 늘리기 위해서는 C_{PD} 및 C_{IN} 의 값을 줄이거나, 증폭기의 이득을 높여야 한다. 하지만, 이득 값이 크게 되면 회로의 안정성이 떨어지고, C_{PD} 값 또한 동작속도에 따라 대부분 정해지므로 그 값을 줄이는 것에 한계가 있다.

트랜스임피던스 증폭기는 기본적으로 미분 회로이므로 불안정성을 내재하고 있다. 따라서 회로를 안정하게 만들기 위해 C_F 를 반드시 피드백 저항과 병렬로 함께 추가해야 한다. 하지만 C_F 는 회로의 대역폭을 제한하므로 안정성을 유지하면서도 최대한 높은 대역폭을 얻기 위한 C_F 의 최적값을 찾는 것이 요구된다. 다음 식(23)은 C_F 의 최적값을 구하는 방정식이다.

$$C_F = \sqrt{\frac{C_{IN}}{2\sqrt{2\pi f_{GBP} R_F}}} \quad (21)$$

만일 계산된 C_F 값이 회로에 떨림현상을 발생시킬 경우, C_F 값을 올리는 과잉 보정 방법을 사용하여 울림을 줄일 수 있지만 트랜스임피던스 증폭기의 대역폭은 줄어든다.

4.4 신호처리기 설계

신호처리기는 전단증폭기로부터 얻어진 신호에 노이즈 제거, 구형파 복원등의 가공과정을 거쳐 원신호 복원을 하는 최종적인 역할을 한다. 첫 번째로 처음 전단증폭기로부터 얻어진 신호의 노이즈를 노이즈 필터로 제거하였으며,(Fig. 42) 두 번째로 계측증폭기를 이용해 신호처리에 적합한 전압의 신호를 얻을 때까지 증폭한다.(Fig 43) 세 번째로 미리 설정된 신호처리기를 통과시키면 구형파로 복원이 되며(Fig. 44) 이어서 네 번째 단계인 신호 안정 회로를 통과하면 다듬어진 완전한 구형파를 얻을 수 있다. (Fig. 45)

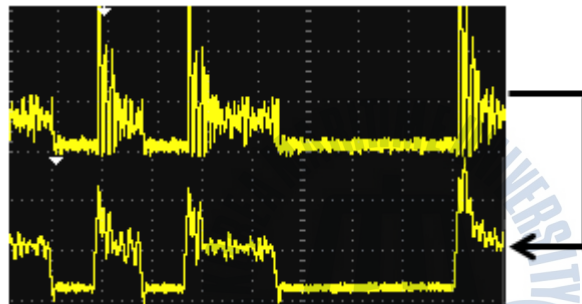


Fig. 42 Application of the noise filter

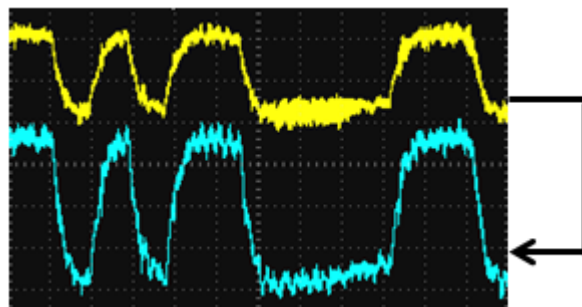


Fig. 43 Application of the Instrument AMP

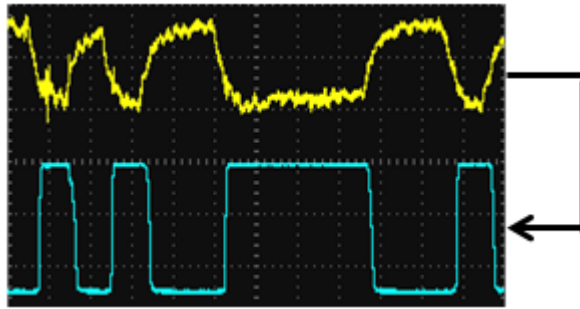


Fig. 44 Signal processing of the signal

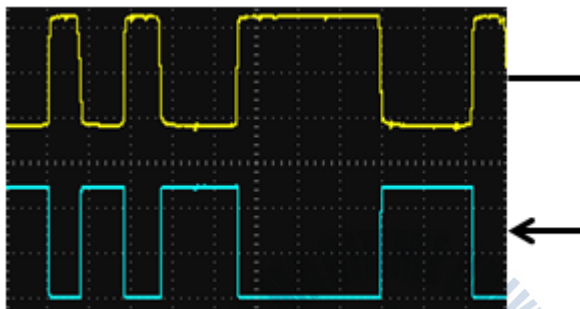


Fig. 45 Stabilized signal

제 5 장 수중 LED통신 성능실험 및 결과

5.1 LED 송신기의 광 확산 제어기 성능실험

리니어 액추에이터를 시작위치 0mm에서 목표위치 각각 15mm, 30mm, 50mm으로 이송하도록 PWM 신호를 인가했을 때, 측정한 리니어 액추에이터 스트로크의 시간-거리 그래프를 Fig 46, 47, 48에 나타내었고, 수중 조명등의 광 방사각 실험결과를 촬영한 사진을 Fig 49, 50, 51 에 나타내었다. 따라서 LED 송신기의 광 확산 제어기가 잘 작동함을 확인하였다.

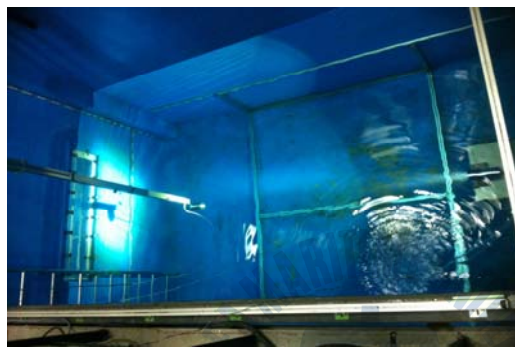


Fig. 46 50 mm focus of lens

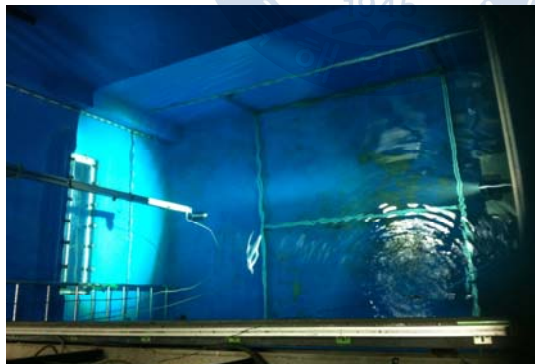


Fig. 47 25 mm focus of lens

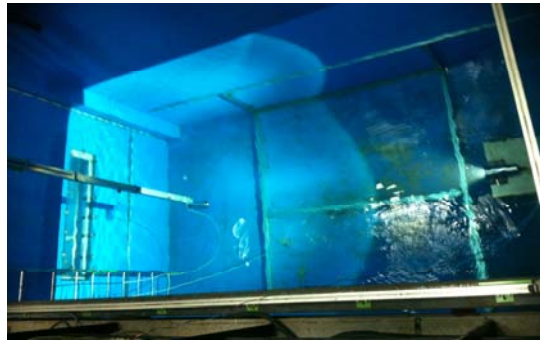


Fig. 48 0 mm focus of lens

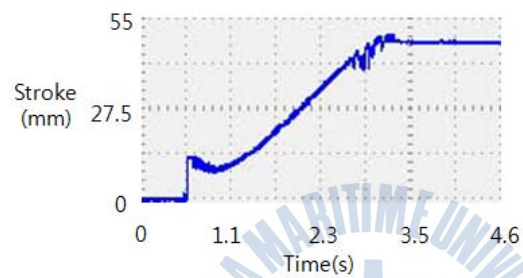


Fig. 49 position control of LED lamp for long focusing (50mm)

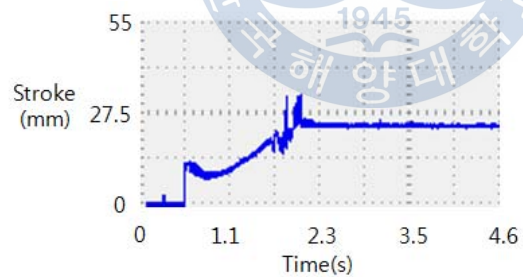


Fig. 50 position control of LED lamp for medium focusing (30mm)

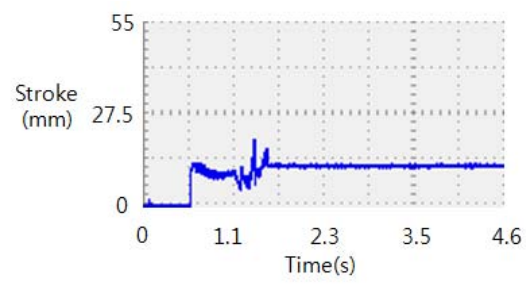


Fig. 51 position control of LED lamp for short focusing (15mm)



5.2 수중통신 성능평가 프로그램 제작

수중통신 성능을 정량적으로 평가하기 위한 프로그램을 제작하였다. 이 프로그램은 랜덤함수를 이용해 무작위로 생성된 송신부 출력 데이터를 LED 송신부로 전송하고, 광수신기로 수신된 데이터를 받아서 원래 신호와 비교하여 정상적으로 신호수신이 되었는지 검사하는 원리로 얼마나 먼 거리에서 정확한 통신이 가능한지 측정할 수 있도록 하였다. (Fig 52)

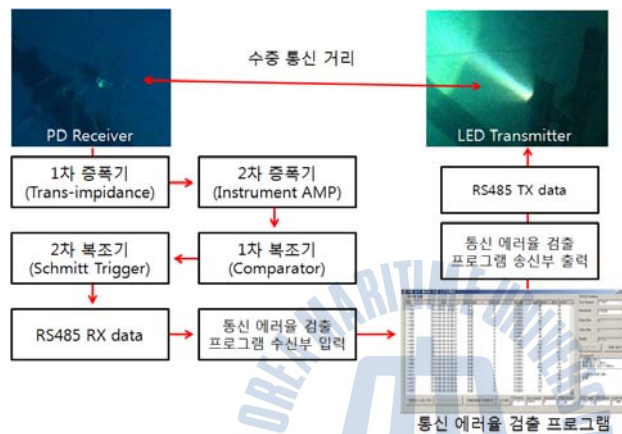


Fig. 52 Test System Block Diagram.

이동	시간	통신 결과	지연 시간	송신량	수신량	ERROR	Wait time
11384	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	80	80	
11395	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	5A	5A	
11396	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	AD	AD	
11397	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	79	79	
11398	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	5D	5D	
11399	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	77	77	
11400	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	96	96	
11401	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	75	75	
11402	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	80	80	
11403	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	C2	C2	
11404	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	B2	B2	
11405	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	45	45	
11406	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	EC	EC	
11407	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	2C	2C	
11408	2013-09-30 16:36:27	성공	0	0.05%	07	07	
11409	2013-09-30 16:36:28	성공	0	0.05%	91	91	
11410	2013-09-30 16:36:28	성공	0	0.05%	FA	FA	
11411	2013-09-30 16:36:28	성공	0	0.05%	74	74	
11412	2013-09-30 16:36:28	성공	0	0.05%	0D	0D	
11413	2013-09-30 16:36:28	성공	0	0.05%	7E	7E	
11414	2013-09-30 16:36:28	성공	0	0.05%	C3	C3	
11415	2013-09-30 16:36:28	성공	0	0.05%	D4	D4	
11416	2013-09-30 16:36:28	성공	0	0.05%	1C	1C	

Fig. 53 Error Check Program UI

5.3 PIN 광수신기의 담수 수중통신 성능 실험

일반적인 담수가 담겨진 수조에서, LED 송신부와 PD 수신부의 거리를 수조의 최대거리인 25m로 두고 수중통신 실험을 수행하였다. 통신 에러율 측정 프로그램에서 반복 실험을 수행한 결과(Table 8), 담수중 25m 거리에서 거의 에러 없이 정상적으로 통신이 이루어짐을 확인하였다.

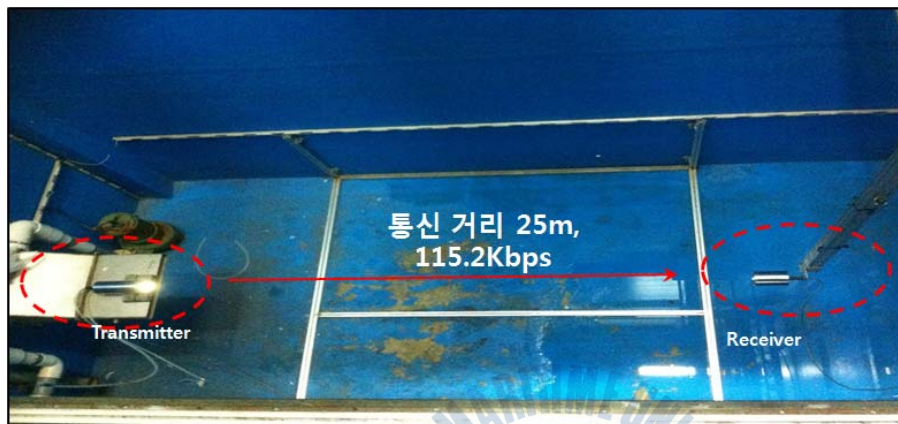


Fig. 54 Picture of underwater communication test

통신 속도	115200 bps
전송한 데이터 갯수	11416
전송 성공 데이터	11412
전송 실패 데이터	4
에러율	0.035%

Table 8 Communication performance results of the PIN receiver in freshwater

5.4 PIN 광수신기의 해수 수중통신 성능 실험

해수중에서도 PIN 광수신기를 이용하여 통신 실험을 수행하였다. 해수 중 통신 성능에 가장 큰 영향을 미치는 해수의 광 투과율 특성은 해역마다 다를 뿐 아니라 계절, 시간, 물 때, 온도, 해류유입 등에 의해 크게 변화할 수 있는 가능성이 크다. 본 논문에서 해수중 통신을 수행한 장소와 시간 등의 자세한 정보를 Table 9 에 나타내었다.



Fig. 55 Undersea communication test place

Table 9 Undersea communication test place

실험 위치	부산광역시 영도구 동삼2동 한국해양대학교 인근 정박지 위도 : 35° 4'27.99"N 경도 : 129° 5'6.19"E
실험 날짜	2013년 11월 16일 20시
물때	6물 (조수간만 최대)
수심	5m
탁도	7~8 NTU

해상 위에서의 원활한 실험을 위하여 송신부와 수신부 실린더가 고정된 알루미늄 프로파일을 로프로 체결하여 소형선박의 현측방향으로 입수시킨 후 수중통신 실험을 수행하는 방법을 사용하였다. (Fig 56) 이 방법은 프로파일에 고정된 각 실린더의 위치와 로프의 길이를 가변적으로 바꿈으로 통신 거리와 수심을 자유자재로 조절할 수 있는 이점이 있다.

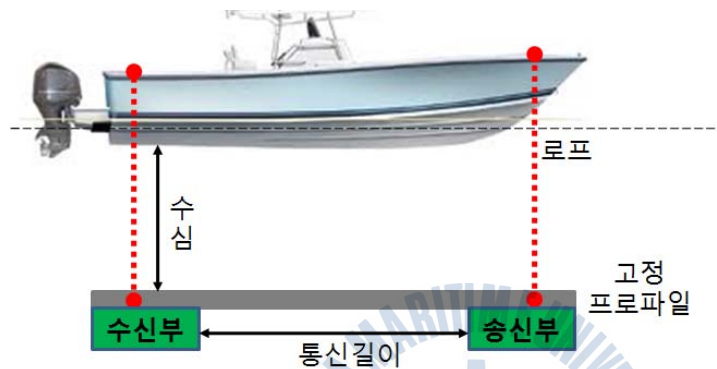


Fig. 56 PIN receiver performance testing methods in undersea



Fig. 57 Picture of PIN receiver performance testing in undersea

해수중에서 통신거리에 따른 광 감쇠 정도를 확인하기 위하여 송신부 및 수신부 실린더를 수심 2m 정도로 내린 후 수신부 실린더의 위치를 1m씩 이동시켜가면서 출력되는 신호파형을 관찰하였다. 실험결과, 3m 까지는 추가적인 증폭, 복조회로가 불필요할 만큼 아주 양호한 신호가 출력되었지만, 4m부터 신호의 크기가 급격히 감소하고, 6m 거리에서는 신호의 크기가 수백 mV 대로 떨어지면서 노이즈에 의해 파형이 많이 붕괴됨을 확인하였다.

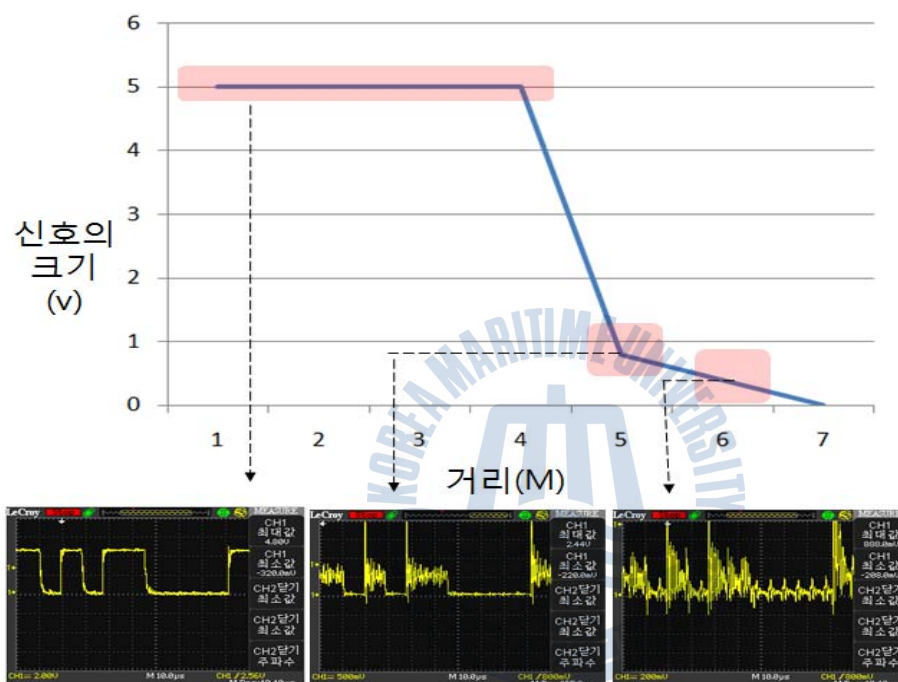


Fig. 58 Output signal in undersea

해수면에서 2m 아래로 송·수신부 실린더를 입수하여 5m 거리에서 수중통신 실험을 수행하였다. 통신 에러율 측정 프로그램에서 반복 실험을 수행한 결과(Table 10), 해수중 5m 거리에서도 거의 에러 없이 정상적으

로 통신이 이루어짐을 확인하였다.

Table 10 Communication performance results of the PIN receiver in seawater

통신 속도	115200 bps
전송한 데이터 개수	138730
전송 성공 데이터	138730
전송 실패 데이터	0
에러율	0%



5.5 PIN 광수신기와 APD 광수신기의 탁도에 따른 수중통신 성능실험

PIN 타입 광수신기와 APD 타입 광수신기의 성능을 비교하고 수중의 탁도에 따라 LED 통신 거리를 추정할 수 있는 기준을 잡기 위한 탁도별 수중통신 성능실험을 수행하였다. 탁도 조절이 가능한 실험수조는 가로 135cm, 세로330cm, 높이112cm 로 약 5000L의 청수를 수용할 수 있다. 또한 주변광의 영향을 최대한 차단하기 위해 검은색 시트지로 수조 내부를 마감하였으며, 검은색 천으로 상부를 완전히 덮을 수 있도록 준비하였다. 본 논문에서는 실험의 편의를 위하여 높이 60cm까지 2000L의 청수를 채워 실험을 수행하였다. 수조의 탁도 모사는 정제된 머드분말을 투입하는 방법을 사용하였으며, 수중용 탁도계를 이용하여 탁도를 실측하였다. 또한 참고문헌[5]에 정의된 머드 농도에 따른 탁도 방정식 (식 24)이 본 논문의 실험에서도 일치함을 확인하였다.

$$\text{물 1리터당 머드의 양(g)} = 0.0025 * \text{탁도(NTU)} \quad (22)$$



Fig. 59 Picture of water tank

수조에 송신부와 수신부를 Fig 60과 같이 통신거리 3m로 고정하여 설치하였고, Fig 61 의 플로우차트에 설명된 프로세스에 따라 통신성능을 평가하였다. 통신성능 실험 프로세스의 초기 상태는 1NTU의 탁도를 가지는 담수환경 하에서 LED 최소 출력 8.6W 를 유지하는 상태로 실험 수행을 시작하였다. 통신 에러율 검사 프로그램에 의해 에러율이 1%이하로 정상적인 통신이 가능함을 확인할 때마다 수조의 탁도를 1NTU씩 높였다. 탁도가 높아짐에 따라 광감쇠 및 노이즈에 의해 통신 에러율이 증가하게 되는데, 이때마다 LPF 차단주파수, 전압비교기의 레퍼런스 전압, LED 전압의 세 가지 변수를 에러 없이 통신이 가능할 때까지 재조정하였다. 또한 이 변수들의 재조정만으로 정상적인 통신을 유지하기 불가능한 경우 보레이트를 일정량 낮추는 방법으로 정상적인 통신이 가능한 조건을 찾아내었다. 실험결과, PIN 광수신기는 깨끗한 수중에서 최대 500Kbps, 8NTU 의 수중에서는 115Kbps까지 1% 이내의 에러율로 수중통신이 가능함을 확인하였다. 그리고 APD 광수신기는 탁도가 8NTU 이하에서는 1Mbps, 25NTU 이하에서는 0.5Mbps, 35NTU 이하에서는 0.05Mbps 까지 1% 이내의 에러율로 수중통신이 가능함을 확인하였다. 실험결과를 Fig 62에 나타내었다.

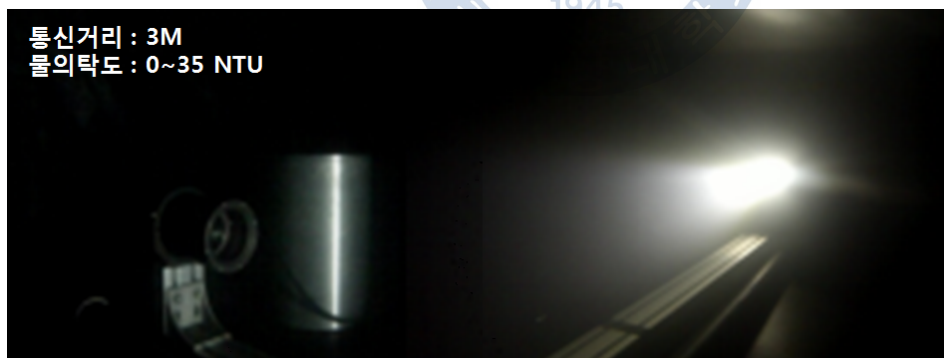


Fig. 60 LED communication test in water tank

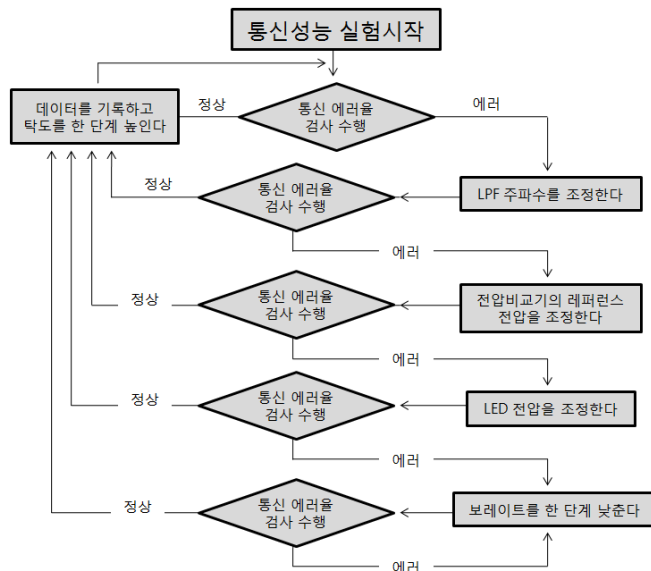


Fig. 61 LED communication test process flowchart

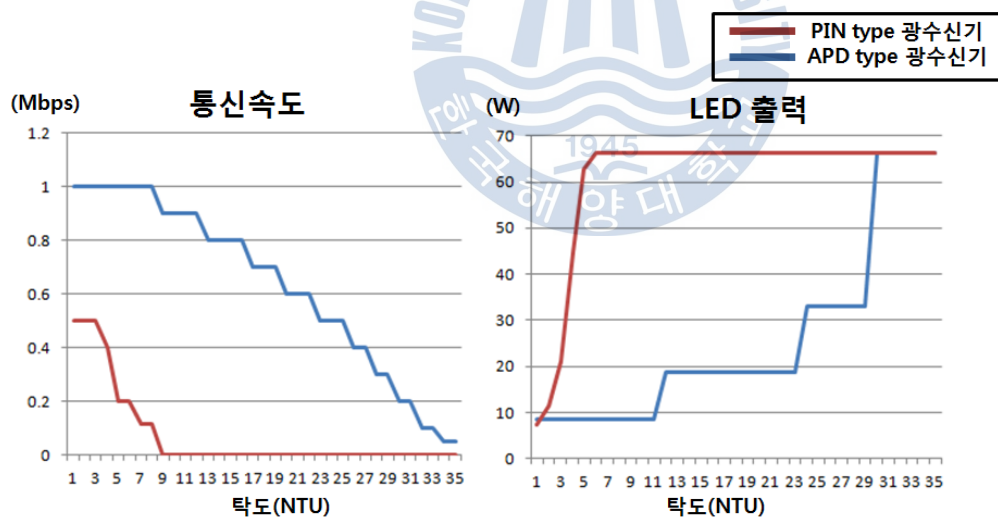


Fig. 62 LED communication test result

5.6 수중LED통신을 이용한 수중동영상 통신 실험

촬영한 수중 동영상 데이터를 수중LED통신을 통해 전송하기 위한 개념 설계도를 Fig 63 과 같이 나타내었다. LED 송신기와 광수신기가 한 쌍으로 구성된 통신모듈을 수면과 수중에 각각 설치한다. 그리고 이 통신모듈들은 서로 양방향으로 통신하며 수상에 설치된 통신모듈이 동영상 데이터 전송을 요청하는 광 신호를 송신하면 수중에 있는 모듈이 이를 인식하고 같이 탑재된 카메라로부터 동영상데이터를 받아 광 신호로 변환하여 송신한다. 그리고 수면의 통신모듈이 동영상데이터를 수신하게 되면 사용자의 모니터에 동영상을 출력한다.



Fig. 63 The concept of underwater video communication system

5.6.1 양방향 LED 수중통신 시스템 구성

수중동영상 통신을 위해 LED 송신기와 광수신기가 한쌍으로 구성된 통신모듈을 2개 제작해서 서로 양방향 통신이 가능하도록 하였다. 2개의 통신모듈 중 첫 번째 통신모듈은 수면에 설치되는 타입으로(Fig 64) 사용자의 모니터에 연결하여 수중동영상을 출력할 수 있도록 하였다.(Fig 65) 두 번째 통신모듈은 수중에 설치되는 타입으로 수중에서의 설치가 간편하도록 하나의 수밀 용기에 LED 송신 및 수신기와 카메라를 함께 탑재하였다. 또한 외부 전원 공급 없이 작동할 수 있도록 배터리를 내장하였다.(Fig 66)



Fig. 64 Picture of LED Transmitter



Fig. 65 Picture of LED Transmitter user monitor box

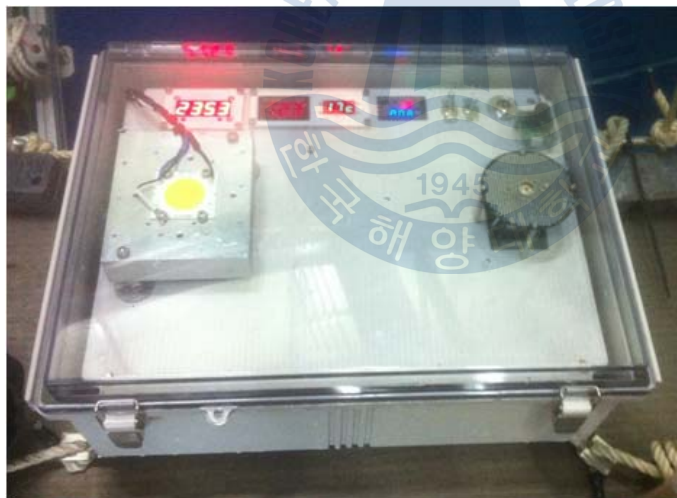


Fig. 66 Picture of LED Transponder

5.6.2 수중동영상 촬영 장치

수중 동영상 촬영용으로 사용할 카메라는 LED 통신시스템과의 인터페이스를 편리하게 하기 위하여 UART 프로토콜로 영상정보를 획득할 수 있는 카메라를 사용하였다. 본 카메라는 30만화소이며 최대 115.2Kbps까지 통신속도를 지원한다.

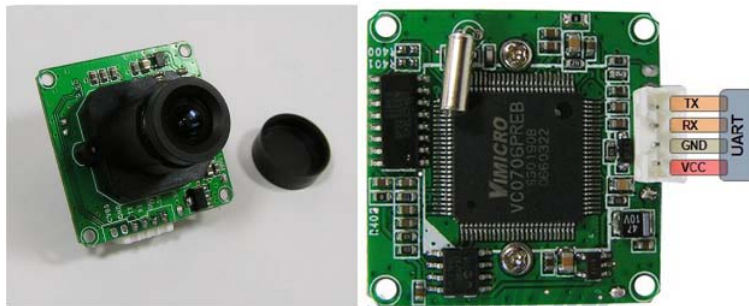


Fig. 67 Underwater video camera module



Fig. 68 Camera operation program UI

5.6.3 수중LED통신을 이용한 수중동영상 통신 시스템 실험 및 결과

Fig 69 는 수조의 수면과 수중에 각각 설치된 수중통신 모듈들의 모습을 나타내었다. 수면에 위치한 통신모듈은 수조바닥으로부터의 높이를 3m로 하고 수조바닥에 위치한 통신모듈은 수면 통신모듈과의 수평 거리를 2m 정도로 하였다. 따라서 실질적인 통신거리는 3.6m 이다.

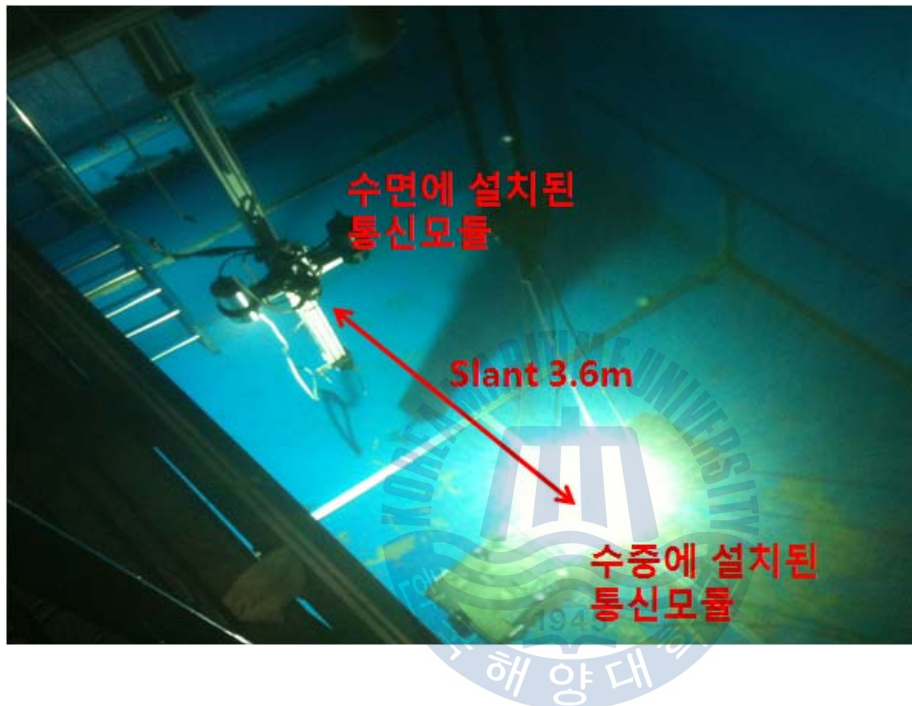


Fig. 69 Picture of testing in water tank

수중동영상 전송 실험을 수행하였다. 카메라가 물체를 정상적으로 촬영하고 있는지 확인하기 위해 모형선박을 수면에 띄워 촬영대상으로 하였다. 본 논문에서 제작한 수중 LED통신 시스템은 앞서 수행한 실험결과에 따르면 최대 1Mbps까지 통신가능한 것으로 확인하였지만 수중카메라의 최대 통신속도가 115.2Kbps 까지 제한되어 있었기 때문에 115.2Kbps의

통신속도로 수중동영상 전송 실험을 수행하였다. 성공적으로 수신된 모형 선박 주행의 수중동영상 사진을 Fig 70에 나타내었다.

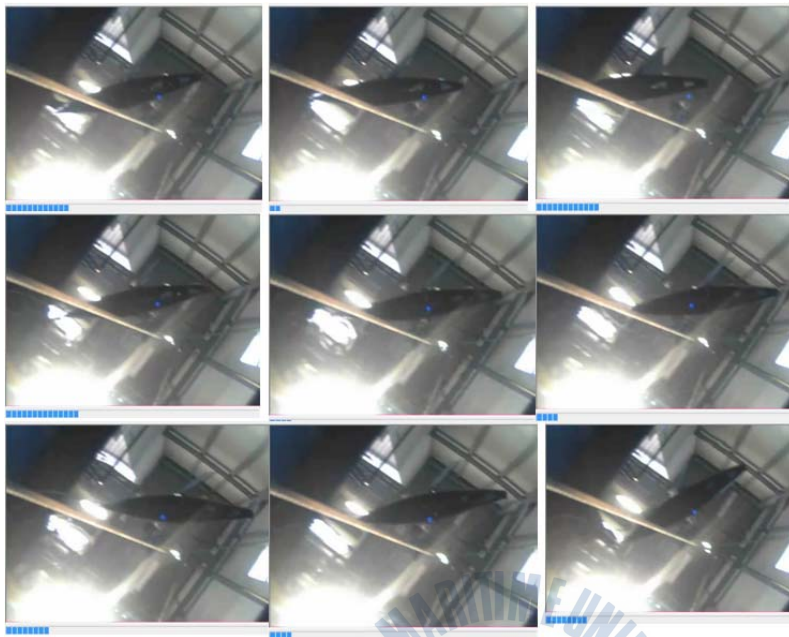


Fig. 70 Received underwater video pictures



제 6 장 결론

6.1 결론

본 논문은 수중 고속통신을 실현하기 위한 수중 LED통신 시스템 연구로 수중에서 광 확산을 제어할 수 있는 LED 송신기 설계, PIN 포토다이오드 광수신기 설계, APD 광수신기 설계, 수중 동화상 데이터 전송 시스템 및 수중 양방향 LED 통신 시스템 설계를 수행하였으며 개발한 시스템을 담수와 해수 및 탁도조절 실험수조에서 통신성능 평가 시험과 수중에서 동화상 데이터 전송 실험을 수행하였다.

실험결과, 광 확산을 제어할 수 있는 LED 송신기는 수중에서 광 확산을 잘 제어 할수 있음을 확인하였고, PIN 수신기를 이용한 수중통신 성능 시험에서는 담수 25m, 8NTU의 해수 5m에서 115Kbps 로 안정적인 통신이 가능함을 확인하였다.

수중의 탁도에 따라 LED 통신 거리를 추정할 수 있는 기준을 잡기 위한 탁도별 수중통신 성능실험에서 PIN 광수신기는 깨끗한 수중에서 최대 500Kbps, 8NTU의 수중에서는 115Kbps까지 1% 이내의 에러율로 수중통신이 가능함을 확인하였다. 그리고 APD 광수신기는 탁도가 8NTU 이하에서는 1Mbps, 25NTU 이하에서는 0.5Mbps, 35NTU 이하에서는 0.05Mbps 까지 1% 이내의 에러율로 수중통신이 가능함을 확인하였다.

마지막으로 수중에서 동화상데이터 전송 실험을 수행하기 위해 수중 양방향 LED 통신 시스템을 설계하고, 수조에서 동화상데이터 전송 성능 평가시험을 수행하였다. LED 송신기와 광수신기가 한쌍으로 구성된 통신모

둘 2개를 수조에서 수면과 수중에 각각 설치하고 통신거리를 3.6미터로 하고 카메라의 최대 통신속도인 115.2Kbyte 의 전송속도로 동화상데이터 전송 실험을 성공적으로 수행하였다.

향후 APD 광수신기와 Pan-Tilt를 활용한 실해역 수중통신 및 더 높은 통신속도의 카메라나 사이드 스캔 소나 등으로 더 빠른 동화상 데이터 전송 시험을 수행할 예정이며, 통신속도와 거리를 늘리기 위한 연구로 5Mbps 이상 통신 가능한 LED 송신기 및 광수신기 설계, 광섬유나 복합 렌즈를 이용하여 빛의 지향성과 빛의 수신감도를 더욱 높일 수 있는 광학 장치 설계, LED 통신을 이용한 수중로봇의 수중 위치 파악 기술 등의 연구를 계획하고 있다.



참고문헌

- [1] Farr, N., Bowen, A., Ware, J., Pontbriand, C., & Tivey, M. (2010, May). An integrated, underwater optical/acoustic communications system. In OCEANS 2010 IEEE-Sydney (pp. 1-6). IEEE.
- [2] K-R. Sohn, “A study on the short-range underwater communication using visible LEDs,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 37, no. 4, pp. 425-430, 2013 (in Korean). [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2013.37.4.425>
- [3] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, “Underwater acoustic sensor networks: research challenges,” vol. 3, pp. 257-279, Ad Hoc Networks, 2005.
- [4] D. Anguita, D. Brizzolara, and G. Parodi, “VHDL modules and circuits for underwater optical wireless communication systems,” WSEAS Trans. Communications, vol. 9, pp. 525-552, 2010
- [5] M .Sui, X. Yu, and F. Zhang, “The evaluation of modulation

techniques for underwater wireless optical communications,” IEEE International Conference on Communication Software and Networks, pp. 138-142, 2009.

[6] N. Farr, A. Bowen, J. Ware, C. Pontbriand, and M. Tivey, “An integrated, underwater optical/acoustic communications system,” Ocean Physics and Engineering, pp. 1-6, 2010.

[7] D. Anguita, D. Brizzolara, G. Parodi, and Q. Hu, “Optical wireless underwater communication for AUV: preliminary simulation and experimental results,” IEEE Oceans, pp. 1-5, June 2011.

[8] M. Doniec, C. Detweiler, I. Vasilescu, and D. Rus, “Using optical communication for remote underwater robot operation,” International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4017-4022, 2010.

[9] Pontbriand, C., Farr, N., Ware, J., Preisig, J., & Popenoe, H. (2008, September). Diffuse high-bandwidth optical communications. In OCEANS 2008 (pp. 1-4). IEEE.

[10] Fair, N., Chave, A. D., Freitag, L., Preisig, J., White, S. N., Yoerger, D., & Sonnichsen, F. (2006, September). Optical modem technology for seafloor observatories. In OCEANS 2006 (pp. 1-6). IEEE.

- [11] Farr, N. E., Ware, J. D., Pontbriand, C. T., & Tivey, M. A. Demonstration of Wireless Data Harvesting from a Subsea Node Using a “Ship of Opportunity” .
- [12] Bowen, A. D., Jakuba, M. V., Farr, N. E., Ware, J., Taylor, C., Gomez-Ibanez, D., ... & Pontbriand, C. An Un-Tethered ROV for Routine Access and Intervention in the Deep Sea.
- [12] <http://moeri.kordi.re.kr>; Accessed 7 Feb 2013.
- [13] <http://155.230.104.21>; Accessed 7 Feb 2013.
- [14] 소우영, 소강요, 김달우, 홍정기, 김동언, & 이동녕. (1995). 청록색 레이저의 수중 전파 특성에 관한 연구. 한국광학회 동계학술발표회논문집, 58-58.
- [15] 김영평, & 최중운. (1991). 청록색 레이저의 수중통신 응용 (Blue-Green Lasers and Their Application to Underwater Communication). 한국통신학회논문지, 16(12), 1211-1218.
- [16] Arnon, S., & Kedar, D. (2009). Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network. JOSA A, 26(3), 530-539.

- [17] 손경락. (2013). 해수채널 환경에서 가시광 통신 성능 해석. 한국마린엔지니어링학회지, 37(5), 527-532.
- [18] 김연주, & 손경락. (2012). 근거리 수중 광무선 통신을 위한 주파수 변조 기반 오디오 전송 시스템 연구. 한국마린엔지니어링학회지, 36(1), 205-210.
- [19] 손경락. (2013). 근거리 수중통신을 위한 가시광 LED 적용에 관한 연구. 한국마린엔지니어링학회지, 37(4), 425-430.
- [20] 손경락, 손창우, & 김성호. (2012). 백색 LED 기반 수중 및 수상-수중 간 광무선 통신시스템 연구. 한국마린엔지니어링학회지, 36(2), 309-314.
- [21] QIAN, Wei-guo CHEN, Xin-jun LEI, Lin, "The optical characteristics of 300 W green light LED lamps used for fish aggregation" Journal of Dalian Ocean University / v.27, pp.471-476. 2012.
- [22] Cameras, U. V., & Moon, I. S. 비디오 카메라를 이용한 서해안 수중가시거리 측정.